

ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

LIVRABLE 4 : PROPOSITION DE MESURES D'ATTÉNUATION ET RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES POUR LUTTER CONTRE LES ICU

04/12/2023

CAHIER SPÉCIAL DES CHARGES CDA/012152/YOU

7 fiches-outil!

TABLE DES MATIÈRES

Glossaire	7
1 - Effet d'îlot de Chaleur Urbain (ICU)	
Contexte et objectifs de l'étude	12
Été 2022 : campagne expérimentale	14
ICU, confort thermique et bien-être	16
2 - Mesures d'atténuation :	
Fiches-action	
Vue synoptique	20
1. Ombre	
1.1 Voiles (rues)	22
1.2 Tentes	24
2. Végétation haute	
2.1 Arbres	26
2.2 Jardinières surélevées	28
2.3 Plantes grimpantes sur structure	30
2.4 Forêt mobile	32
3. Perméabilité et végétation basse	
3.1 Buissons, herbes hautes	34
3.2 Jardins de pluie	36
3.3 Déminéralisation	38
4. Eau	
4.1 Brumisateurs	40
4.2 Jeux d'eau	42
5. Bâtiments - Façades	
5.1 Plantes grimpantes sur façades	44
5.2 Isolation	46
6. Bâtiments - Toitures	
6.1 Toitures vertes	48
6.2 Toitures blanches	50
Analyse transversale	52

3 - L'arbre en ville	59
Effet rafraîchissant	62
Sécheresse	63
Sol et racines	66
Choisir l'essence	76
Planter un arbre	78
4 - Matériaux urbains	81
Albédo	82
Capacité thermique	84
Effusivité	86
Perméabilité et végétation	90
Quel matériau choisir?	96
5 - Morphologie urbaine	99
Morphologie et vent	100
Effet canyon	114
Etudes d'ensoleillement	118
Utiliser la morphologie	126
6 - Typologie d'espace	129
Îlot de fraîcheur	130
Concevoir l'îlot de fraîcheur	134
Aménagement sur dalle	136
Rénover une dalle	140
Rue	142
Arbre et largeur de rue	144
Cour d'école / crèche	158
Concevoir une cours oasis	168
Bâtiment	170
Nouveau quartier	176
7 - Conclusion	181
Bibliographie	187

Glossaire

Glossaire

Albédo

L'albédo est défini comme le rapport entre l'énergie solaire réfléchie par une surface sur l'énergie incidente. Quand le rayonnement solaire arrive sur une surface opaque, une partie de l'énergie est réfléchie (cette fraction correspond à l'albédo) et le reste est absorbé par la surface (1 - albédo). Les surfaces ayant un faible albédo deviennent alors plus chaudes que celles avec un fort albédo.

Effet canyon

Les rues de type canyon sont des rues étroites bordées en continu par de grands bâtiments. Cette configuration entraîne des réflexions successives des rayons solaires, qui se trouvent « piégés » dans la rue et participent à leur échauffement. Les rues canyon accentuent l'ICU.

Enrobé

Un enrobé est un type de revêtement de chaussées, trottoirs, zones de stationnement... Il s'agit d'un mélange de graviers, de sable, de particules fines et de liant. La présence de sable en quantité plus ou moins importante permettra de favoriser la perméabilité du revêtement. Il s'agit d'un matériau compacté lors de sa mise en œuvre. Le liant peut être soit bitumineux (chaussées et trottoirs), dérivé du pétrole, soit végétal (usages mode doux), couleur miel.

Evapotranspiration

L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des végétaux. Toute évaporation implique une absorption de chaleur et crée un rafraîchissement de la température d'air à proximité.

Facteur de vue du ciel

Le facteur de vue du ciel correspond au ciel observable à partir de la surface considérée. Il caractérise la morphologie urbaine. Une rue haute et étroite aura un facteur de vue du ciel faible comparé à un espace ouvert.

Géotextile

Les géotextiles à fonction anti-racinaire permettent de guider le développement racinaire en limitant fortement la pénétration des racines dans les zones sensibles. Résistant aux déchirures mais perméable, le géotextile laisse passer l'eau et l'humidité, permettant ainsi au sol de respirer.

Îlot de chaleur urbain (ICU)

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène à l'échelle du climat local qui se caractérise par la différence de température, le plus généralement de la température de l'air, entre la ville et la campagne ou entre la ville et une moyenne régionale. L'enjeu le plus important de l'îlot de chaleur est relatif à un rafraîchissement nocturne des surfaces plus lent en été, qui provoque des températures ambiantes élevées durant la nuit.

Inertie thermique

L'inertie thermique d'un matériau représente la résistance au changement de sa température lorsque intervient une perturbation de cet équilibre thermique. En quelque sorte, l'inertie thermique peut être vue comme étant la « lenteur » avec laquelle un matériau s'échauffe ou se refroidit.

PET (Physiological Equivalent Temperature, température ressentie)

L'indice PET caractérise le confort thermique en fonction de la température de l'air (°C), de la température radiante (T° des parois °C), de l'humidité relative (%), du rayonnement global (W/m²), de la vitesse du vent (m/s), ainsi que de paramètres humains comme les vêtements et le métabolisme.

Rayonnement Infrarouge

Le rayonnement infrarouge est un rayonnement électromagnétique dont le domaine de longueurs d'onde est compris entre celui du rayonnement visible, qui s'achève avec la lumière rouge entre 750 et 800 nm, et celui des ondes radioé-

lectriques, qui commence conventionnellement à 1 mm, soit 1 000 nm. Dans le cadre de l'ICU, le rayonnement infrarouge est la chaleur que les matériaux urbains restituent à l'atmosphère la nuit ; ce rayonnement est un des responsables du phénomène de l'ICU.

Rugosité aux vents

La rugosité définit la résistance au vent : plus il y a d'obstacles face à l'écoulement de l'air, plus la rugosité est élevée, et plus le mouvement de l'air est lent. La rugosité relative correspond à la rugosité dans une direction, à partir d'un point central.

Rapport H/L ou H/W

Le rapport H/L (Hauteur / Largeur) ou H/W (Hight / Width) est le rapport de la hauteur et de la largeur dans une rue de type « canyon » (haute et étroite).

Toiture verte

Une toiture verte est une toiture pourvue d'un certain type de végétation. On fait la distinction entre deux types de toitures vertes : des toitures vertes intensives et extensives.

Toiture verte extensive

Une toiture verte extensive est plantée de mousses, plantes grasses (toiture sédum) et épices qui ne nécessitent pas beaucoup d'entretien. Ce type de toit n'est pas ou peu praticable, mais il a un poids beaucoup plus léger qu'une toiture verte intensive. L'avantage de ce type de toit est qu'il est meilleur marché, plus léger et plus facile à réaliser qu'une toiture verte intensive.

Toiture verte intensive

Une toiture verte intensive est une toiture pourvue d'un jardin comme on trouve normalement au niveau du sol. Elle peut être planté d'arbustes, d'épices, d'herbes et quand même de certains types d'arbres. Chez ce type de jardin sur le toit, il va de soi que la construction de la toiture doit être assez solide parce qu'un tel jardin a un poids considérable (plus de 200 kilos par mètre carré !). Une toiture verte intensive peut être utilisée comme un jardin normal et nécessite beaucoup d'entretien.

1

Effet d'îlot de chaleur urbain (ICU)

Qu'est-ce que l'effet d'îlot de chaleur urbain ? Quelles sont les zones les plus vulnérables ? Quelle est la différence de température entre le centre de Bruxelles et une zone rurale périphérique ? Quel est le ressenti des habitants dans les zones densément bâties ?

Contexte, objectifs et méthodologie

Cette étude sur les îlots de chaleur urbains (ICU) a pour but d'en déterminer les causes et les facteurs aggravants et de proposer des actions et recommandations concrètes que la Ville de Bruxelles pourrait mettre en œuvre afin de limiter ce phénomène.

Contexte

Face aux enjeux en matière de changements climatiques, les politiques urbaines s'efforcent avant tout de réduire les pressions à la source (limitation des émissions atmosphériques de polluants et gaz à effet de serre). À côté de cette approche fondamentale, l'action publique s'attache aussi à développer, complémentaiement, une approche plus locale avec, par exemple, la réalisation d'aménagements pour renforcer les îlots de fraîcheur ou l'évaluation et la cartographie à l'échelle des rues des îlots de chaleur permettant notamment d'identifier les zones les plus affectées.

Par ailleurs, le développement de la végétation est de plus en plus perçu comme pouvant contribuer à réduire localement le problème d'inconfort thermique des habitants. Ces dernières années ont vu naître un intérêt croissant de la part du monde scientifique mais aussi des gestionnaires et des responsables concernant les multiples services écosystémiques rendus par les espaces verts et la végétation en milieu urbain. Outre le fait qu'elle constitue un élément important de la qualité de vie des citoyens, la nature en ville remplit de nombreuses autres fonctions notamment en matière de régulation des écosystèmes (par ex. support à la biodiversité, régulation du cycle hydrologique, captage du dioxyde de carbone, etc.) et améliore la qualité de l'air.

Plusieurs plans de la Ville de Bruxelles comportent ainsi des mesures visant à accroître la présence de végétation en ville dans une optique de bénéficier de services écosystémiques (Plan Canopée, Plan Communal de Développement Durable PCDD, Plan Climat...).

UNE APPROCHE CROISÉE : SCIENTIFIQUE + URBANISTIQUE + SOCIOLOGIQUE

La particularité est ici d'avoir unis des approches et des visions différentes et complémentaires : une approche **scientifique**, basée sur des mesures sur terrain et des simulations numériques, une approche **urbanistique** s'appuyant sur la connaissance du contexte urbain bruxellois, ainsi qu'une approche **sociologique** qui permet de remettre l'habitant au centre de l'étude. La mise en commun de ces différents regards permet d'enrichir la vision sur l'ICU et les solutions à y apporter.

Cette étude se veut également **proche du terrain**. Les solutions proposées pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain reposeront sur des mesures par sondes durant l'été 2022 ainsi que des entretiens avec les habitants et des enquêtes publiques. Des mesures à **court et long terme** seront proposées.

Les mécanismes à la base de ces impacts sont néanmoins complexes et leurs effets réels, en milieu urbain, généralement peu connus. En pratique, ceux-ci dépendent de très nombreux facteurs (taille de l'espace vert ou de l'élément verdurisé, densité et volume de la végétation, caractéristiques du feuillage, configuration spatiale des lieux, radiation solaire, vents dominants...). Par ailleurs, la végétation urbaine peut également être à l'origine d'impacts négatifs sur la qualité de l'air (piégeage des polluants sous le dôme de feuillage, émissions de composés organiques volatiles, pollens allergisants). Des éléments qui sont à prendre en compte lors de cette étude et dans les recommandations d'aménagement.



Les vagues de chaleur en ville

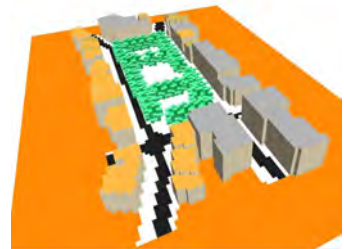
En raison du réchauffement climatique, les conditions météorologiques extrêmes, telles que les vagues de chaleur, devraient devenir plus fréquentes, plus longues et plus intenses. Au cours de l'été 2019, l'Europe a connu deux vagues de chaleur record. En Belgique par exemple, des températures élevées sans précédent de plus de 41°C ont été enregistrées pendant la vague de chaleur de fin juillet 2019.

Qu'est-ce que l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) ?

L'effet d'îlot de chaleur urbain (ou Urban Heat Island en anglais) est le phénomène par lequel la température moyenne dans les zones urbaines est plus élevée que dans les zones rurales environnantes. Quelles sont les raisons de cette différence de température ? Dans les zones urbaines, la chaleur solaire est absorbée par les matériaux de construction, et les bâtiments hauts et denses retiennent cette chaleur et limitent le refroidissement par la circulation du vent. En outre, les zones urbaines sont généralement densément peuplées et produisent de la chaleur, due aux transports et à la climatisation, par exemple. L'effet d'îlot de chaleur urbain est plus important la nuit, surtout par temps clair et sans vent. Pendant ces nuits, il peut faire jusqu'à 5 °C de plus dans des villes comme Bruxelles que dans les zones rurales voisines. (Source : IRM)

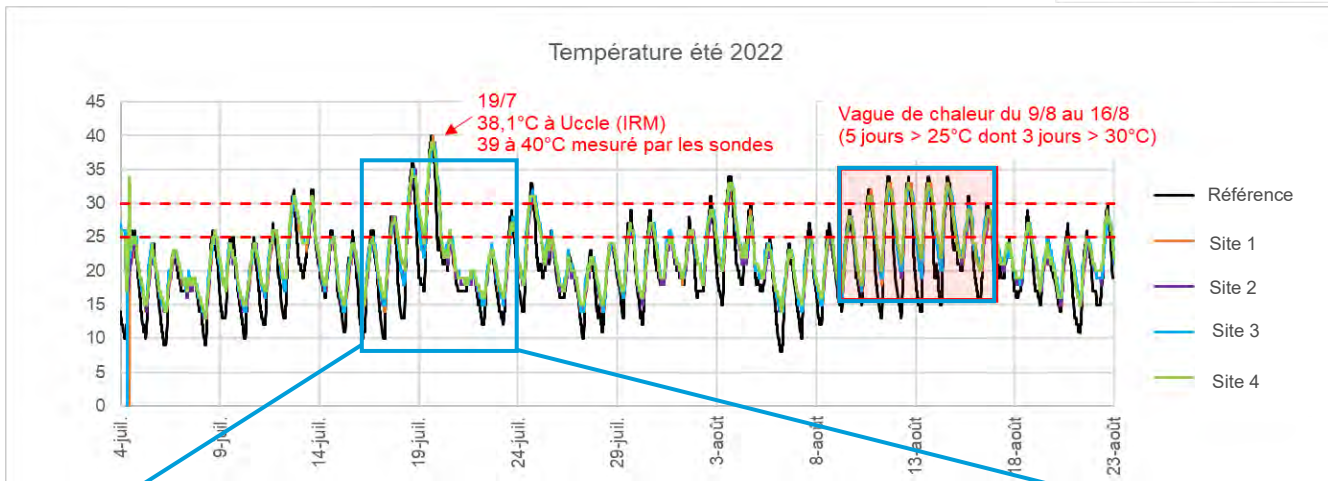
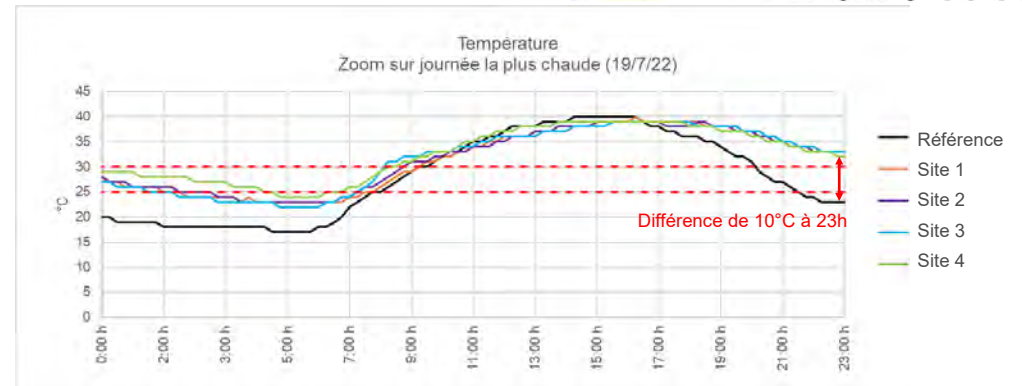


Effet d'îlot de chaleur urbain (Source : <https://community.wmo.int>)



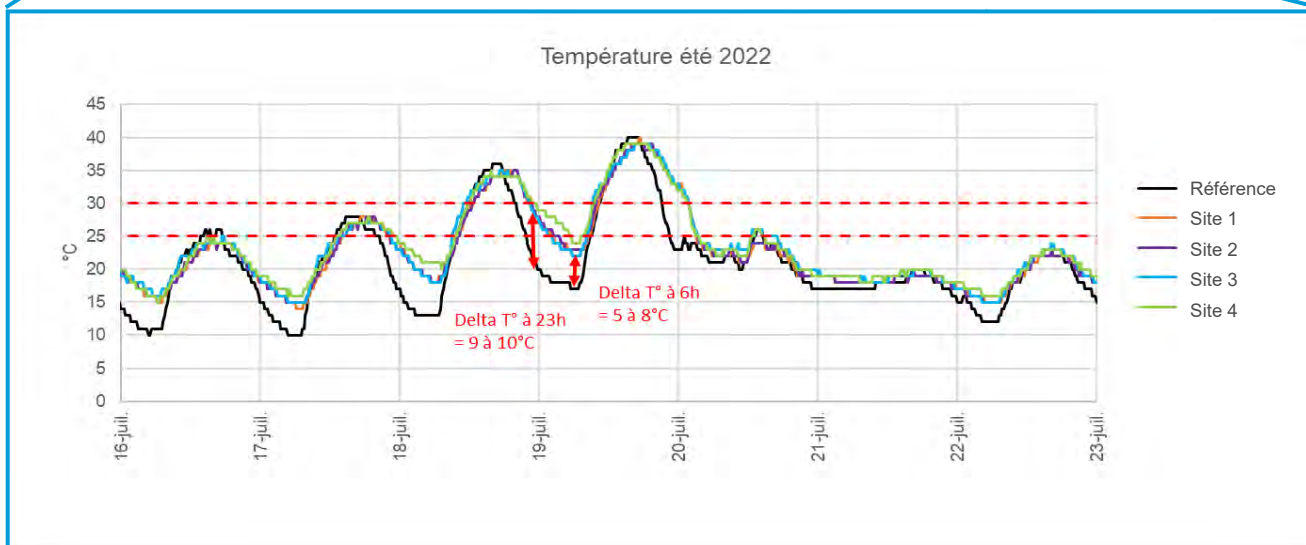
Été 2022 : campagne expérimentale

Les mesures s'étendent du 4 juillet 2022 au 22 août 2022. Cette période est marquée par un pic de température allant jusqu'à **40°C** le 19 juillet, ainsi qu'une **vague de chaleur** entre le **9 et le 16 août**, une vague de chaleur étant définie par l'Institut royal météorologique (IRM) comme étant une période affichant une température maximale d'au moins 25°C durant cinq jours consécutifs au moins, parmi lesquels le seuil des 30°C est atteint au moins trois jours.



L'effet d'îlot de chaleur est caractérisé par la **différence de température** entre milieu urbain et rural. Cette différence est **variable** d'un jour à l'autre et varie également au cours d'une journée. Elle est **maximale à 23h** car c'est le moment où les **matériaux urbains commencent à libérer la chaleur qu'ils ont accumulée en journée**. Lors de la nuit du 18 au 19 juillet, la différence est de **9 à 10°C à 23h**, et de 5 à 8°C à 6h du matin. En journée, la température maximale est similaire, voire sensiblement plus élevée en milieu rural.

On observe un décalage temporel, appelé « déphasage » : la T° maximale est atteinte plus tard en ville (17h) qu'à la campagne (15h), et la T° minimale également (6h à la campagne et 7h en ville).



ICU, confort thermique et bien-être

L'ICU est caractérisé dans cette étude en croisant plusieurs points de vue : d'une part, le regard **urbanistique et sociologique** du ressenti subjectif de la chaleur au travers d'observations, entretiens et enquêtes sur la voie publique, et d'autre part, le regard **scientifique**, avec des mesures par sondes météorologiques et par image satellite, mais aussi des simulations numériques de la température ressentie en journée. Ceci nous permet d'appréhender le phénomène **de manière globale** pour **mieux définir le rôle des pouvoirs publics et les mesures qu'ils peuvent mettre en place pour améliorer le bien-être des Bruxellois.e.s.**

ICU

L'effet d'îlot de chaleur est, par définition, la **différence** de **T° de l'air** entre la **ville et la campagne**. Cette différence de température a été mesurée par les **sondes météorologiques**, qui ont montré que les **différences pouvaient aller jusqu'à 10°C (T° de l'air) en soirée lors de canicules**. L'ICU est par contre inexistant, voire inversé en journée. Cette différence de T° est provoquée par plusieurs facteurs.

- Les **matériaux** typiquement utilisés en ville (béton, briques, bitume, ...) qui vont emmagasiner la chaleur du soleil la journée, pour la restituer la nuit.
- Une **végétation** moins importante qu'en milieu rural. La végétation permet de rafraîchir l'air par évapotranspiration, ce qui humidifie l'air et donc le rafraîchit.
- **L'imperméabilité** des sols. En milieu urbain, l'eau de pluie percole directement dans les réseaux d'égout et ne s'infiltre pas dans le sol, contrairement aux milieux ruraux où les sols humides peuvent laisser l'eau s'évaporer sous l'effet de la chaleur, résultant en un rafraîchissement de l'air.

Confort thermique

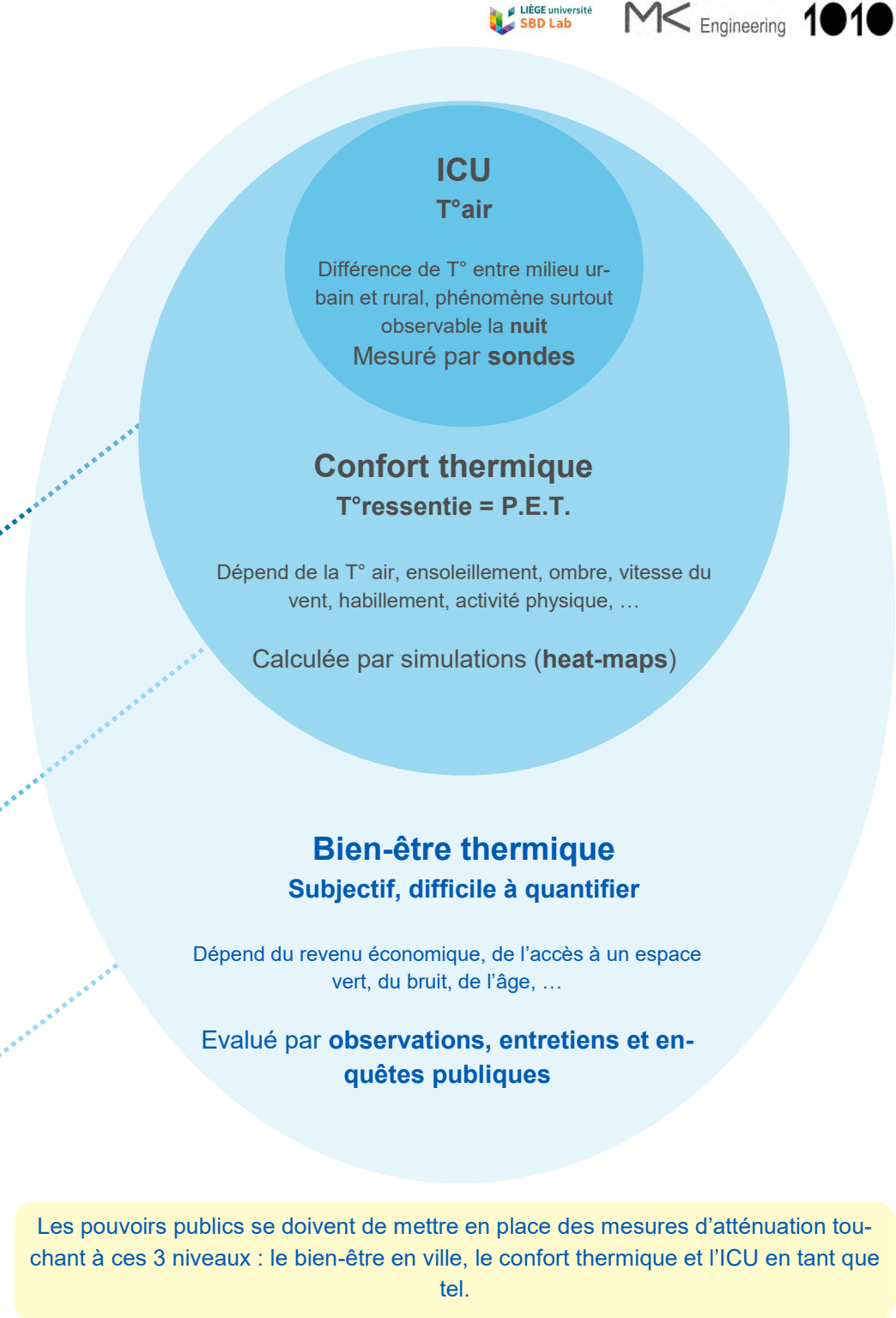
Le confort thermique est la **chaleur ressentie** d'un point de vue biologique. Lors d'une journée chaude et ensoleillée, le ressenti n'est pas pareil si on se trouve à l'ombre ou au soleil, même si la température de l'air est identique. Le confort thermique dépend de la température de l'air, de la température des parois qui nous entoure (murs, sol, ... et cette température est souvent différente de la température de l'air), de la vitesse du vent, de l'humidité de l'air, ainsi que des paramètres humains (corps, vêtements, activité physique).

Il est exprimé en **P.E.T.** (Physiological Equivalent Temperature) et a été simulé pour chaque site pilote au cours de la journée la plus chaude de l'été 2022. Les résultats sont présentés sous forme de « **heat-maps** ». **Lorsque le thermomètre affiche 40°C, la température ressentie peut atteindre 50°C si on se trouve en plein soleil!** Les facteurs défavorisant le confort thermique sont **le manque d'ombre et le manque d'air**.

Bien-être thermique

Le bien-être thermique est **impossible à quantifier avec des chiffres**. Mais il n'en est pas moins important ! Il dépend bien entendu de la température ressentie, qui dépend elle-même de la température de l'air, mais dépend également de l'âge, de la santé, du revenu, du bruit, de l'accès ou pas à un espace vert, à l'eau...

C'est ce que nous avons évalué auprès des citoyens et passants au moyen **d'observations, d'enquêtes et entretiens**. Cette approche sociologique a permis de mettre en évidence **l'inconfort ressenti** lors de vagues de chaleur, et les facteurs aggravants comme la **séniorité, le bruit, le manque d'espaces verts, le besoin d'un accès à l'eau...** surtout dans les **zones plus vulnérables** où les habitants, vivant en appartement, sont très dépendants de l'espace public.



2

Mesures d'atténuation

Quelles mesures d'atténuation peuvent être mises en place ? Pour quelle typologie d'espace ? Avec quelle efficacité ? Quel coût ? Les mesures d'atténuation sont reprises sous forme de « fiche-mesure », reprenant certaines informations communes de manière générique, ainsi que des remarques propres à chaque mesure.

Vue synoptique

Les mesures proposées pour atténuer le stress thermique peuvent être regroupées en deux catégories : celles mises en place dans l'espace public, et celles touchant au bâti. Dans l'**espace public**, on distingue les dispositifs amenant de l'ombre, la végétation, la perméabilité, et la présence d'eau. On peut intervenir sur les **bâtiments** au niveau de leur façade et/ou de leur toiture.

MESURES PROPOSEES

ESPACE PUBLIC	Ombre -10°C	Voiles (rue) 1.1 Tentes 1.2
	Végétation -10°C	Arbres 2.1 Jardinière surélevée 2.2 Plantes grimpantes sur structure 2.3 Forêt mobile 2.4
	Perméabilité 0 à 5°C	Buissons, herbes hautes 3.1 Jardins de pluie 3.2 Déminéralisation 3.3
	Eau Non chiffrable	Brumisateurs 4.1 Jeux d'eau 4.2
BÂTI	Façade -4°C	Plantes grimpantes sur façade 5.1 Isolation de façade 5.2
	Toiture -4°C	Toiture verte 6.1 Toiture blanche 6.2

Efficacité des mesures

L'efficacité de chaque type de mesure est reprise dans le tableau schématique ci-dessus en °C P.E.T. Par exemple, les dispositifs d'ombre permettent de gagner 10°C par rapport à une situation « en plein soleil ». La justification de ces valeurs se trouve dans chaque fiche mesure, et se base sur le résultat de simulations numériques, comme expliqué dans l'encadré ci-contre.

Les dispositifs amenant de l'**ombre** se classent parmi les mesures les plus efficaces en période de vague de chaleur intense. En effet, ils permettent

de bloquer les rayons solaires et diminuent par-là le stress thermique ressenti.

Espace public

La végétation dont il est question ici est la **végétation haute**, capable de porter de l'ombre au niveau des passants. Son efficacité se doit principalement à l'ombre qu'elle apporte, et dépendra fortement de la densité des feuilles et du chevauchement éventuel des couronnes d'arbres entre elles. L'évapotranspiration a elle aussi un effet, et dépend de la quantité d'eau présente dans le sol (phénomène dont il n'a pas été tenu compte dans les

simulations).

La **perméabilité** des revêtements de sol, que ce soit par un revêtement **minéral perméable ou végétal**, permet à l'eau présente dans le sol de s'évaporer et refroidir ainsi non seulement le sol lui-même, mais aussi l'air ambiant. Cependant, l'évaluation des mesures s'est faite en période de sécheresse, lorsque les ressources en eau étaient épuisées, ce qui explique que nous avons considéré ici un rafraîchissement négligeable. Notons toutefois que l'effet rafraîchissant est notable si le sol est humide (jusqu'à -5°C). L'intérêt de la perméabilité des sols est également de venir en **complément de la végétation** pour apporter à celle-ci le plus d'eau possible et garantir ainsi leur survie lors d'étés chauds et secs.

La présence de **l'eau** permet aux usagers de se rafraîchir de manière très efficace ; c'est une des mesures les plus plébiscitées lors des enquêtes publiques auprès des habitants, travailleurs sociaux, enfants et adolescents. Lors d'une journée caniculaire, quand même l'ombre ne suffit plus, seul le recours à l'eau permet de se rafraîchir.

Bâti

Les interventions sur les **toitures** et **façades** présentent une efficacité modérée sur la diminution du stress thermique extérieur. Relevons toutefois que ces mesures ont un impact positif, mais non traité dans le cadre de cette étude, sur le confort thermique à l'intérieur des bâtiments, ainsi que sur la consommation de climatisation.

Chaque fiche mesure comporte un tableau qui reprend :

- La zone d'intervention : espace public ou bâti ;
- La compatibilité ou non avec la présence d'impétrants dans le sol ;
- La profondeur de substrat nécessaire ;
- La nécessité ou pas de recourir à un permis d'urbanisme ;
- Si l'intervention est lourde ou légère ;
- L'éventuelle opportunité de rénovation de l'espace ;
- Des considérations sur l'entretien ;
- Attention particulière au patrimoine historique (bien classés, repris sur la liste de sauvegarde, biens inscrits à l'inventaire du patrimoine régional, ... voir <https://monument.heritage.brussels/fr/> ;
- Des considérations sur l'arrosage (si mesures vertes) ;
- La nécessité de prévoir une stratégie de récupération d'eau pluviale ;
- Le risque de vandalisme ;
- Le délais à prévoir pour la mise en œuvre : court, moyen ou long terme ;
- Une estimation du budget nécessaire ;
- L'efficacité attendue, sur base de simulation numérique de la température ressentie un jour de canicule ;

... Ainsi qu'une série de remarques spécifiques à chaque mesure.

EFFICACITÉ DES MESURES D'ATTÉNUATION

Il a été décidé d'évaluer l'efficacité des mesures en termes de confort thermique, mesuré en degrés «PET» (Physiological Equivalent Temperature). Des simulations numériques ont été effectuées sur les sites pilotes choisis pour évaluer l'impact de chaque mesure sur le confort thermique. Ceci a été réalisé en comparant la situation existante avec la situation aménagée pour atténuer l'îlot de chaleur urbain (ICU). Les simulations ont été réalisées pour la journée la plus chaude de l'été 2022, le 19 juillet, lorsque la température de l'air a atteint 40°C en après-midi. Les résultats sont présentés sous forme de cartes thermiques, *heat maps*, à 16h, heure la plus chaude de la journée.

Cependant, il est important de noter que l'efficacité des mesures n'est pas uniforme dans l'espace et dépend du contexte urbain spécifique. De plus, cette efficacité variera d'un jour à l'autre, et au cours d'une même journée. Néanmoins, l'analyse qui a été menée a permis de comparer les mesures d'atténuation entre elles.

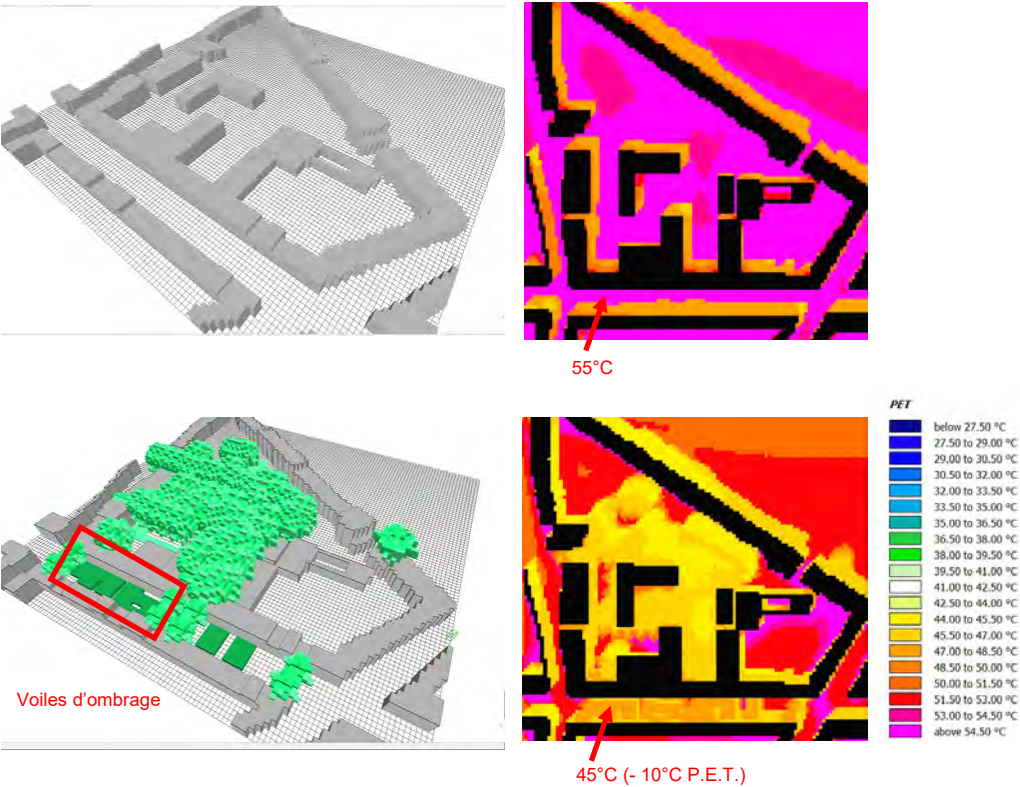
1 - Ombre

1.1 Voiles d'ombrage

Les canopées de rue, ou voiles d'ombrage, peuvent être suspendues entre les maisons dans des petites places ou au-dessus de rues étroites. Ils peuvent être fabriqués dans différents types de matériaux et dans une variété de couleurs. Ils peuvent servir de mesure temporaire pour fournir de l'ombre pendant les étés chauds.

Rafrâichissement attendu : -10°C P.E.T.

Simulation 19 juillet 2022 à 16h (température de l'air : 40°C) :



Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	EP et bâti
Compatible impé-trants?	Oui
Prof substrat néces-saire?	Sans objet
Nécessite permis d'urbanisme?	Si temporaire : une demande sur la plateforme OSIRIS peut suffire. Si impact sur différents propriétaires ou bâtiment classé, alors permis obliga-toire. Solution très appropriée dans le domaine privé d'une école par exemple.
Intervention légère ou lourde?	Légère
Opportunité de rénovation	/
Entretien	Faible maintenance et réparation ponc-tuelle
Patrimoine / péri-mètre?	Demande de permis nécessaire si <10m d'un bâtiment classé
Arrosage	Sans objet
Récupération eau pluviale	Sans objet
Risque vanda-lisme?	Non
Court terme / moyen / long	Court terme
Budget	Limite inférieure : bâche blanche stan-dard HDPE perforée avec câbles de tension : 500€ par 10m² + frais d'instal-lation. Limite supérieure HDPE imper-méable avec structure de support des poteaux 3750€ par 10m² + frais d'instal-lation.
Efficacité	A l'ombre : jusqu'à -10°C

Synthèse

Typologie

Bâtiment

Bât classé

Rue

Place publ.

Chaleur

Air T. T° de l'air

P.E.T. T° ressentie

Stratégie

Ombre - Réflexion - Évaporation - Ventilation

Bénéfices

Biodiversité

Infiltration

Réduction du bruit

Capture du CO2

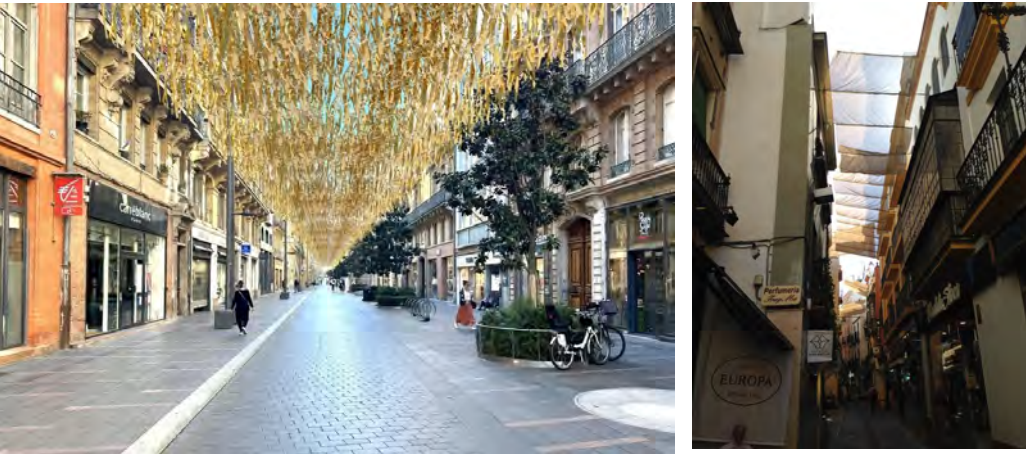
Coûts

Constr. Constr.

Entretien Entretien

Bien-être

- Informations complémentaires
- A mettre en place uniquement si la plantation d'arbres n'est pas possible
 - Effectuer un diagnostic d'ensoleillement (course du soleil)
 - Accroches sur façades : doivent supporter les efforts du vent
 - Economie circulaire : utilisation de vieilles voiles de bateaux, bâches plastiques de camion ou publicitaires.
 - Les pompiers imposeront probablement des exi-gences : l'accessibilité des façades pour les camions-échelles (respecter une distance minimale de 4 m) et l'incombustibilité, le dégagement de fumée et la résis-tance du matériau choisi.
 - Attention si rue polluée (trafic) ou si beaucoup de rejets d'air chaud de climatisation : l'air pollué ou chaud restera piégé au fond de la rue.



La rue d'Alsace-Lorraine à Toulouse ombragée par des rubans (©Mairie de Toulouse) . Les rubans permettent une meilleure ventilation que les voiles.

Exemple de voiles à Séville (<https://www.slowtravelblog.fr/>)

1 - Ombre

1.2 Tentes de réception

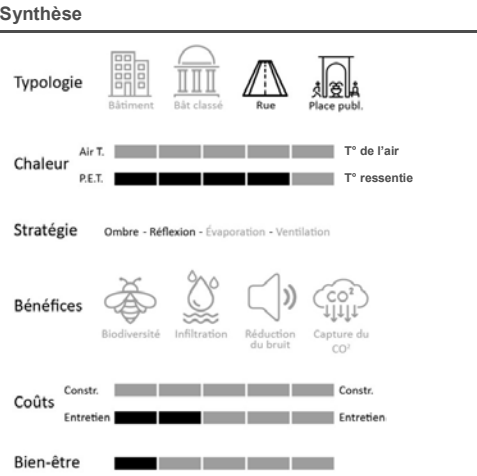
Les tentes de réception peuvent être une solution très simple et bon marché pour ajouter temporairement plus d'ombre aux espaces publics. S'il y a de l'intérêt, des projets plus complexes impliquant la conception et l'installation d'un pavillon peuvent également être menés. L'objectif de cette installation temporaire est de réfléchir les rayons solaires et de fournir de l'ombre et un rafraîchissement au niveau local.

Rafrâichissement attendu : -10°C P.E.T. (à l'ombre)



PIOVENEFABI, Parckdesign Pavillon, Bruxelles 2016 (installation temporaire) © Martina Bjorn

Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	EP
Compatible avec impétrants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	Sans objet
Nécessite permis d'urbanisme?	En cas de tente temporaire (mois d'été) dans l'espace public, une demande de permis via la plateforme OSIRIS peut suffire.
Intervention légère ou lourde?	Légère
Opportunité de rénovation	/
Entretien	Faible maintenance et réparation ponctuelle
Patrimoine / périmètre?	demande de permis nécessaire si <10m d'un bâtiment classé
Arrosage	Sans objet
Récupération eau pluviale	Sans objet
Risque vandalisme?	Oui
Court terme / moyen / long	Court terme
Budget	70 000 € pour un pavillon de 128 m². Une tente de réception préfabriquée peut être achetée à partir de 800 € pour 13 m².
Efficacité	A l'ombre : jusqu'à -10°C



- Informations complémentaires
- Si mesure permanente et surface importante : peut nécessiter des fondations en béton. Etude de sol préalable.
 - Si mesure temporaire : plots en béton posés sur le sol.
 - Déconseillé pour les lieux très venteux.



PIOVENEFABI, Parckdesign Pavillon, Bruxelles 2016 (installation temporaire) © Martina Bjorn

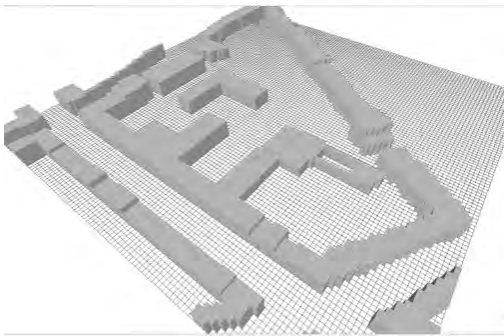
2 - Végétation

2.1 Arbres

La plantation d'arbres et de petites forêts urbaines est l'une des mesures les plus intéressantes pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain. La canopée fournit de l'ombre en été mais laisse passer le soleil en hiver. En outre, l'évapotranspiration permet de rafraîchir l'air et le système racinaire souterrain améliore le stockage de l'eau. Non seulement les arbres améliorent la température, mais ils offrent également de nombreux avantages liés à la biodiversité, au stockage de l'eau, à la qualité de l'air, au bien-être mental et ils peuvent être une source d'énergie ou de nourriture si le contexte le permet.

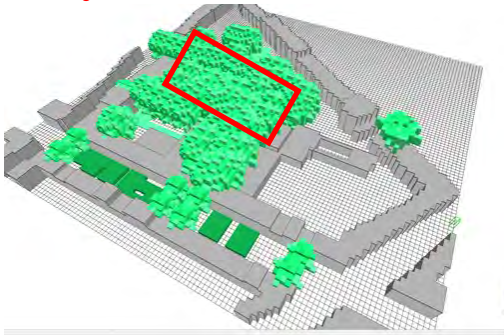
Rafraîchissement attendu : -10°C P.E.T.

Simulation 19 juillet 2022 à 16h (température de l'air : 40°C) :



55°C

Végétation dense



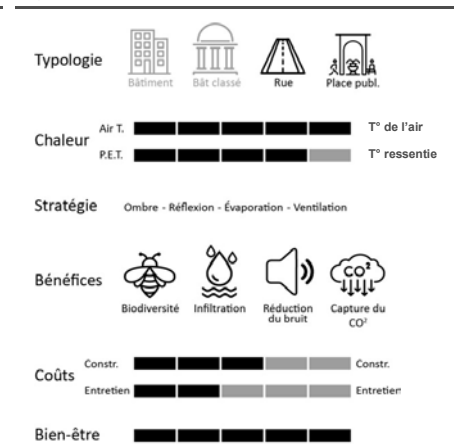
45°C (- 10°C P.E.T.)



Points d'attention

Espace public (EP) et/ou bâti?	EP
Compatible avec impétrants?	Prévoir éventuel budget de dévoiement des réseaux (+ voir partie 3 <i>L'arbre en ville</i>)
Prof substrat nécessaire?	Voir partie 3 <i>L'arbre en ville</i>
Nécessite permis d'urbanisme?	un permis n'est pas nécessaire pour les petites opérations. Il appartient à l'autorité chargée de délivrer les autorisations de juger s'il y a lieu d'imposer un permis ou pas.
Intervention légère ou lourde?	Lourde
Opportunité de rénovation	Rénovation de l'espace entier (revêtement, sous-sol, dévoiement des impétrants, récupération EP...)
Entretien	Elagage, suivi de l'état phytosanitaire
Patrimoine / périmètre?	demande de permis nécessaire si <10m d'un bâtiment classé
Arrosage	Pendant les 2 premières années puis pendant sécheresses uniquement.
Récupération eau pluviale	Nécessaire
Risque vandalisme?	pas de vandalisme, mais penser à la protection de la canopée des arbres contre le stationnement des véhicules...
Court terme / moyen / long	Long terme
Budget	de nombreux facteurs jouent un rôle : qualité du sol, type et taille de l'arbre, frais de transport,... varient entre 25€ et 1000€ par arbre
Efficacité	A l'ombre : jusqu'à -10°C

Synthèse



Informations complémentaires

- Favoriser la plantation de végétaux au pied de l'arbre (enrichissement de la terre, maintien de l'humidité du sol).
- Prévoir une continuité entre les fosses d'arbres (trame brune).
- Les revêtements coulés, même poreux, sont à proscrire car la porosité se comble au fil du temps et empêche l'infiltration de l'eau.
- Le degré d'efficacité dépend de la densité du feuillage, de l'essence, de la disponibilité en eau du sol, du revêtement du sol (infiltration d'eau) et de sa qualité (sol décompacté).
- Choisir l'espèce en tenant compte du changement climatique (sécheresse, ...)
- Evaluer la possibilité d'utiliser l'eau de pluie des toitures environnantes. Attention à la pollution éventuelle de l'eau de pluie récupérée au niveau de l'espace public (entretien des terrasses à l'eau de javel, chaussées pour véhicules...).
- Choisir de préférence un mélange d'espèces d'arbres plutôt que la même espèce partout (augmente la résilience, réduit le risque d'échec dû à la vulnérabilité ou aux parasites)
- En période de sécheresse : prévoir arrosage. S'il s'agit d'un arrosage automatique, prévoir raccord à l'eau de ville.



Voir aussi partie 3
L'arbre en ville

Espaces publics de Saintelette à Bruxelles et Molenbeek © Saida pour Agence TER

2 - Végétation

2.2 Jardinières surélevées

Pour les sites dont le sous-sol est occupé par des impétrants, un parking souterrain, une ligne de métro ou autre obstacle souterrain, il est souvent difficile de planter en pleine terre. On peut contourner cette difficulté grâce à une structure surélevée. Ce système a déjà été utilisé à l'avenue Anspach, et de nombreuses variantes sont possibles. En fonction de l'épaisseur du substrat, il est possible de planter des herbes (50 cm), des arbustes (1 m) ou même de petits arbres (1,5 m), si la capacité portante du sol ou de la dalle le permet.

Rafrâichissement attendu : **-10°C P.E.T.** (à l'ombre)



Jardin intérieur avec jardinière surélevée © Floris Steyaert

Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	EP
Compatible avec impétrants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	40 - 80 cm
Nécessite permis d'urbanisme?	Une "petite opération de verdissement" dans les espaces publics ne nécessite généralement pas de permis.
Intervention légère ou lourde?	Légère
Opportunité de rénovation	/
Entretien	
Patrimoine / périmètre?	Pas d'application
Arrosage	Nécessaire si pas de stratégie de récup EP. Privilégier l'aspersion, qui est plus homogène que le goutte-à-goutte.
Récupération eau pluviale	Difficile à mettre en place pour une jardinière
Risque vandalisme?	Pas d'application
Court terme / moyen / long	Moyen terme
Budget	selon les matériaux choisis, entre 2000€ (dalles de récupération) et 8000€ (pierre naturelle avec bancs en bois) par 10m².
Efficacité	A l'ombre : jusqu'à -10°C

Synthèse

Typologie

Chaleur

Air T.

P.E.T.

T° de l'air

T° ressentie

Stratégie

Ombre - Réflexion - Évaporation - Ventilation

Bénéfices

BiodiversitéInfiltrationRéduction du bruitCapture du CO2

Coûts

Constr.

Entretien

Constr.

Entretien

Bien-être

- Informations complémentaires
- Végétation basse ou moyenne, ou plantes potagères.
 - La jardinière peut être connectée au substrat sous dalle (50 cm) si on enlève le revêtement. La hauteur totale de substrat peut alors atteindre 1,5 m et permettre de planter de petits arbres.
 - Choisir les végétaux en tenant compte du changement climatique (sécheresse)
 - Si parking souterrain : étanchéifier le fond des jardinières pour éviter le ruissellement d'eau, et permettre à l'eau excédentaire d'être évacuée par le réseau d'assainissement.
 - Sinon : l'excédent d'eau de pluie peut être infiltré localement. Si le sol n'est pas suffisamment perméable, un tampon souterrain et un massif d'infiltration peuvent être utilisés. Si nécessaire, prévoir une zone d'enracinement avec du sable spécifique et aérer les racines (sol décompacté).



La jardinière peut être entourée de mobilier urbain. Si le substrat est mis en contact avec le sous-sol (enlèvement du revêtement), la profondeur totale peut atteindre 1.5 m et permettre de planter des arbres de taille moyenne.

2 - Végétation

2.3 Plantes grimpantes sur pergola

Les plantes grimpantes sont très faciles à mettre en place en ville : il suffit d'enlever quelques dalles de sol, et le substrat qu'on y trouve est suffisant pour faire pousser la plante. Cette solution ne nécessite pas d'arrosage hors période de sécheresse, et très peu d'entretien. Elle est ici combinée à une pergola pour fournir de l'ombre. Une autre solution (plus onéreuse) consiste à prévoir une « corolle » en pot, qui lui nécessite un arrosage régulier (avec possibilité d'automatisation).

Rafrâichissement attendu : **-10°C P.E.T.** (à l'ombre)



Corolle en pot © UrbanCaopée



Plantes grimpantes sur pergola © Radio France - Valentin Larquier

Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	EP
Compatible avec impé-trants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	50 cm (disponible partout, même sur dalle)
Nécessite permis d'urba-nisme?	Oui
Intervention légère ou lourde?	Légère
Opportunité de rénovation	/
Entretien	Voir arrosage.
Patrimoine / périmètre?	demande de permis nécessaire si <10m d'un bâtiment classé
Arrosage	Plantes dans le sol + pergola : pas d'arrosage nécessaire. Corolle en pot : réserve d'eau dans le pot, à remplir 4x/an
Récupération eau pluviale	Nécessaire si planté dans le sol ; non nécessaire si plante en pot.
Risque vandalisme?	Non
Court terme / moyen / long	Moyen terme
Budget	Pergola simple en bois pour appli-cation dans un parc de quartier : à partir de 2000€ installation incluse pour 10m². Pergola en acier pour application dans les rues/places : à partir de 4000€ par 10m². Corolle en pot : 20.000 €/unité.
Efficacité	A l'ombre : jusqu'à -10°C

Synthèse	
Typologie	Bâtiment Bât classé Rue Place publ.
Chaleur	Air T. T° de l'air P.E.T. T° ressentie
Stratégie	Ombre - Réflexion - Évaporation - Ventilation
Bénéfices	Biodiversité Infiltration Réduction du bruit Capture du CO²
Coûts	Constr. Constr. Entretien Entretien
Bien-être	
Informations complémentaires	

• Choisir l'espèce en tenant compte du changement clima-tique (sécheresse, ...)



Canopée de l'allée Eugène-Delacroix à Rouen (©Ville de Rouen)

2 - Végétation

2.4 Forêt mobile

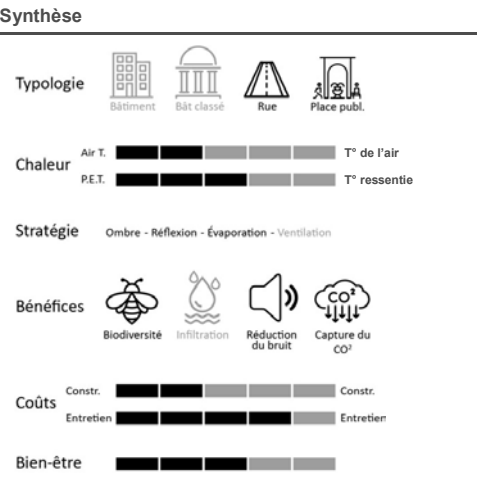
Une forêt mobile consiste en un ensemble de plantes hautes et de petits arbres en pot qui peuvent être regroupés dans les espaces publics pour fournir de l'ombre et du rafraîchissement par évapotranspiration. Les plantes peuvent être déplacées facilement et constituent une mesure temporaire qui peut être mise en œuvre très rapidement. Le concept vient d'une entreprise qui utilise la forêt mobile pour créer un dialogue positif sur la verdure dans la ville et sensibiliser le public en montrant à quoi ressemblerait un espace public avec plus d'arbres et de plantes.

Rafraîchissement attendu : -10°C P.E.T. (à l'ombre)



Forêt mobile © Plant en Houtgoed

Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	EP
Compatible avec impé- trants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	0 cm
Nécessite permis d'urba- nisme?	non, une demande via la plate- forme OSIRIS est suffisante
Intervention légère ou lourde?	Légère
Opportunité de rénovation	/
Entretien	
Patrimoine / périmètre?	Pas d'application
Arrosage	Nécessaire (service à externali- ser, coût élevé)
Récupération eau pluviale	Pas possible pour des plantes en pots
Risque vandalisme?	l'expérience de la forêt mobile montre que les grandes plantes lourdes ne sont pas volées.
Court terme / moyen / long	Court terme
Budget	système d'irrigation automatique + connexion au réseau d'eau po- table dans la rue : environ 2500€. location d'arbres : 80 arbres de différentes tailles, par mois : 1800€, y compris les frais d'instal- lation et de transport.
Efficacité	A l'ombre : jusqu'à -10°C



- ### Informations complémentaires

 - Le contrôle est essentiel : arrosage en fonction de la sécheresse, fertilisation du substrat
 - Possibilité de bacs avec réservoir d'eau
 - Pendant les mois d'hiver (novembre-mars), l'arrosage n'est pas nécessaire. d'avril à octobre, il est possible d'utiliser un système de goutte-à-goutte automatisé. Compter sur une initiative de quartier comporte trop de risques pour la santé des arbres.
 - Nécessite une solution de stockage en hiver.



Arbres en pot (<https://www.vdberk.fr/>)



3 - Perméabilité

3.1 Buissons, fleurs et herbes hautes

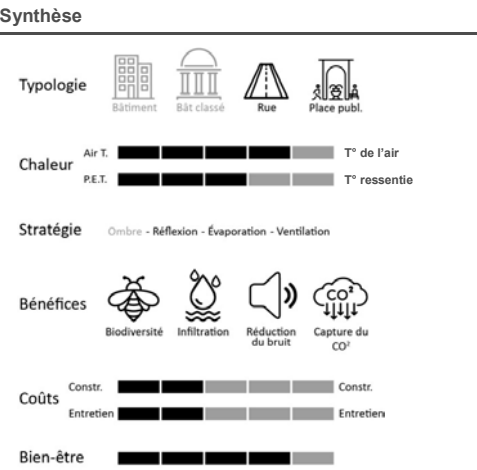
Comme les arbres, les arbustes, fleurs et herbes hautes contribuent à rafraîchir l'environnement par évapotranspiration. Cependant, la quantité de végétal étant moindre, et l'effet de l'évapotranspiration est moins efficace, et vu que ce type de végétation ne porte pas d'ombre, son effet rafraîchissant est assez limité. Mais cette mesure n'en est pas moins importante par son côté complémentaire par rapport aux arbres ; en effet, la végétation moyennement haute permet de protéger les pieds d'arbres de la sécheresse, de nourrir le sol, d'infiltrer l'eau, ... Retenons également que le gazon classique est incroyablement vulnérable à la canicule et perd alors sa capacité de rafraîchissement, alors que les plantes plus hautes augmentent la résilience du sous-sol. Les herbes, les arbustes et les buissons contribuent également grandement à la biodiversité urbaine : nourriture et abri pour les insectes, les oiseaux et les petits mammifères.

Rafraîchissement attendu : -0 à -5°C P.E.T. (sur base d'autres études)
Remarque: l'effet rafraîchissant des sols perméables dépend de leur degré d'humidité. Les simulations réalisées lors de cette étude n'ont pas permis de quantifier cet effet car la journée simulée faisait suite à un épisode de sécheresse. La valeur renseignée de 0 à -5°C est donc basée sur d'autres études.



Les « High Line gardens » de New York est une réalisation exemplaire de régénération urbaine © Claire Takacs Photography 2015

Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	EP
Compatible avec impé-trants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	50 cm (disponible partout, même sur dalle)
Nécessite permis d'urba-nisme?	Pour de petites surfaces, un per-mis n'est pas nécessaire. Il est toutefois recommandé de planifier ces ajustements dans le cadre d'un processus de participation avec le voisinage afin d'évaluer les potentiels et les risques.
Intervention légère ou lourde?	Lourde
Opportunité de rénovation	Rénovation de l'espace entier (revêtement, sous-sol, récupéra-tion EP)
Entretien	Taille, suivi de l'état phytosanitaire
Patrimoine / périmètre?	Pas d'application
Arrosage	Pas nécessaire sauf sécheresse
Récupération eau pluviale	Nécessaire
Risque vandalisme?	La police et les forces de sécurité s'opposent parfois à ces planta-tions parce qu'elles sont utilisées comme cachettes pour le trafic de drogue
Court terme / moyen / long	Moyen terme
Budget	Selon le besoin d'assouplisse-ment / préparation du sol / choix du mélange végétal : entre 1000€ et 2000€ par 10m². il est recom-mandé de clôturer les zones de plantation avec un treillis tempo-raire (treillis de châtaignier) les 5 premières années pour laisser le temps aux plantes de s'enraciner.
Efficacité	Effet indirect (complémentaire de la végétation)



Informations complémentaires

- Choisir l'espèce en tenant compte du changement climatique (sécheresse, ...)



« High Line gardens », New York © Claire Takacs Photography 2015

3 - Perméabilité

3.2 Jardins de pluie

Une déminéralisation maximale permet à l'eau de pluie de mieux s'infiltrer et d'être stockée dans le sous-sol. La reconstitution de la nappe phréatique garantit que l'eau reste disponible pour les arbres et les plantes pendant les étés chauds et secs. La disponibilité de l'eau est cruciale pour que les arbres aient une évapotranspiration optimale. Moins d'eau signifie moins de refroidissement de l'air ambiant. Pour augmenter la possibilité d'infiltration, il est recommandé de construire des espaces verts comme des jardins de pluie qui sont plus bas que la zone environnante. Aujourd'hui, les espaces verts sont souvent construits en hauteur, ce qui a un effet négatif sur l'infiltration et, par conséquent, le refroidissement qui y est associé.

Rafrâichissement attendu : -0 à -5°C P.E.T. (sur base d'autres études)
Remarque: l'effet rafraichissant des sols perméables dépend de leur degré d'humidité. Les simulations réalisées lors de cette étude n'ont pas permis de quantifier cet effet car la journée simulée faisait suite à un épisode de sécheresse. La valeur renseignée de 0 à -5°C est donc basée sur d'autres études.



Parc Simone de Beauvoir à Bruxelles (îlot Fontainas), gestion de l'eau de pluie tendant vers un zéro rejet au réseau d'égouttage ©Bernard Boccara

Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	EP
Compatible avec impé- trants?	Non (ou prévoir dévoiement)
Prof substrat nécessaire?	50 cm (disponible partout, même sur dalle)
Nécessite permis d'urba- nisme?	Oui
Intervention légère ou lourde?	Lourde
Opportunité de rénovation	Rénovation de l'espace entier (revêtement, sous-sol, dévoiement des impé trants, récupération EP)
Entretien	Fauche 1 à 2 fois/an. Maintenance (zones en creux sont propices à l'accumulation de déchets).
Patrimoine / périmètre?	demande de permis nécessaire si <10m d'un bâtiment classé
Arrosage	Pas nécessaire
Récupération eau pluviale	Les jardins de pluie font partie des solution de gestion des EP
Risque vandalisme?	Non
Court terme / moyen / long	Long terme
Budget	en fonction de l'ampleur de l'intervention, de la qualité du sol, du choix des bordures, de la planta- tion. prix indicatif pour une surface de 100m² : 20-30 000 €.
Efficacité	Effet indirect (complémentaire de la végétation)



Jardin de pluie, square Auguste Lumière, Bruxelles © Bruxelles Environnement

Synthèse

Typologie

 Bâtiment

 Bât classé

 Rue

 Place publ.

Chaleur

Air T. 

P.E.T. 

T° de l'air

T° ressentie

Stratégie

Ombre - Réflexion - Évaporation - Ventilation

Bénéfices

 Biodiversité

 Infiltration

 Réduction du bruit

 Capture du CO₂

Coûts

Constr. 

Entretien 

Constr.

Entretien

Bien-être



Informations complémentaires

- Importance de la topographie pour guider l'eau de pluie vers les zones d'infiltration.

3 - Perméabilité

3.3 Déminéralisation

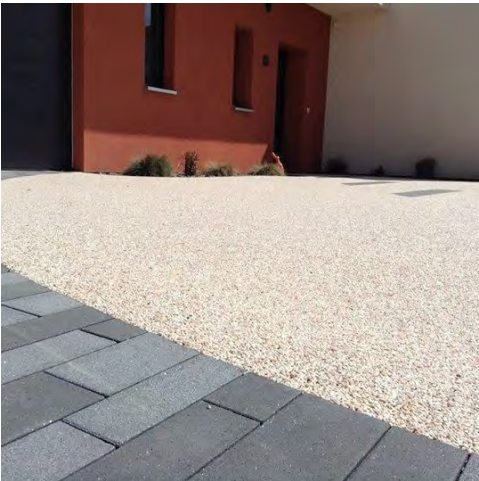
La déminéralisation permettra à l'eau de pluie de pénétrer dans le sol. Le sol préserve ainsi son humidité, qui peut s'évaporer sous l'effet de la chaleur et rafraîchir l'air. L'infiltration de l'eau dans le sol est une mesure qui est indissociable des mesures vertes : elle est nécessaire à la survie des végétaux.

Rafrâichissement attendu : -0 à -5°C P.E.T. (sur base d'autres études)

Remarque: l'effet rafraîchissant des sols perméables dépend de leur degré d'humidité. Les simulations réalisées lors de cette étude n'ont pas permis de quantifier cet effet car la journée simulée faisait suite à un épisode de sécheresse. La valeur renseignée de 0 à -5°C est donc basée sur d'autres études.



Passeig de Sant Joan à Barcelone, Lola Domènech Landezine © Adrià Goula

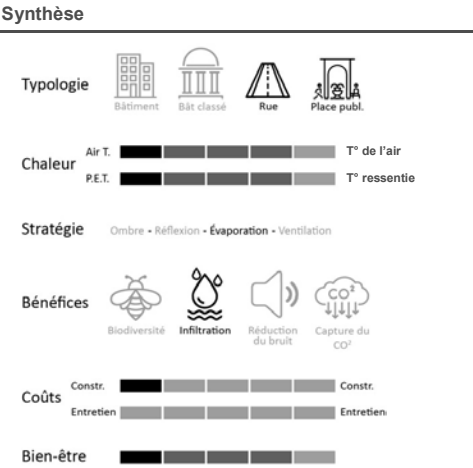


Sol drainant perméable (<https://extranet.jdm-expert.com/>)



Pavements à larges joints (2 à 3.5 cm) © MichaelGaida / pixabay.com

Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	EP
Compatible avec impé-trants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	Sans objet
Nécessite permis d'urba-nisme?	Oui
Intervention légère ou lourde?	Lourde
Opportunité de rénovation	Rénovation de l'espace entier (revêtement, sous-sol)
Entretien	Exemple du béton drainant : pour éviter le colmatage dans la porosité, entretien préventif (lavage à haute pression) et curatif (pression d'eau suivie d'aspiration forte), à faire réaliser par une entreprise spécialisée.
Patrimoine / périmètre?	
Arrosage	Pas nécessaire
Récupération eau pluviale	Permet l'infiltration dans le sol
Risque vandalisme?	non
Court terme / moyen / long	Long terme
Budget	Pavés perméables : de 20 à 50 €/m2. Pavés à joints élargis : 60 à 150 €/m². Dalles alvéolées : de 50 €/m² à 150 €/m². Bétons drainants : de 40 à 70 €/m². Enrobés poreux : 40 à 70 €/m². Granulats drainants : de 10 à 40 €/m². Revêtements meubles organiques : entre 5 et 10 €/m². Mélanges organo-minéraux et couverts enherbés : de 10 à 30 €/m².
Efficacité	Dépend de l'humidité (entre 0 et 5°C)



Informations complémentaires

- Fragilité** des revêtements drainants : ne supportent pas les ouvertures successives pour travaux de voirie ni le passage occasionnel des camions d'entretien. Le passage de véhicules non autorisés (voitures sur pistes cyclables, poids lourds sur trottoirs) peut dégrader le revêtement drainant et compromettre l'infiltration des eaux de pluie.
- Choix du revêtement en fonction de **type d'usager** (piéton, PMR, vélos, véhicules légers, poids lourds...) : voir page 91 (chp 4).
- Travaux importants et **coûteux** (modification complète de la voirie, parking...). Revêtements drainants nécessitent entretien spécifiques et réguliers, parfois onéreux.
- Efficacité** : les pavés poreux, s'ils sont humides, peuvent faire gagner 5°C de température ressentie (pas d'effet s'ils sont secs)
- Alternative** moins onéreuse en installation et entretien : maintenir revêtement imperméable et guider

l'eau vers zone de pleine terre à proximité.

•**Diagnostic en amont : Possibilité d'infiltration?** si construction sur dalle, parking souterrain, station de métro, présence de polluants, hauteur de nappe élevée... : l'**infiltration n'est pas possible**. Dans ce cas, déporter l'eau vers un **réservoir** souterrain, par exemple.

Dalles alvéolaires pour parking (www.o2d-environnement.com)



4 - Eau

4.1 Fontaine - brumisateurs

Les fontaines et brumisateurs apportent beaucoup de fraîcheur, non seulement localement, mais aussi aux alentours grâce à la dispersion des gouttelettes par le vent. L'eau, en s'évaporant, prendra l'énergie de l'air, qui s'en retrouvera rafraîchi de plusieurs degrés.

Rafrâichissement attendu : **non calculé**



Kiosque brumisant et ludique de Water Connect installé à Orly - © WaterConnect



<https://www.brumisol.com>

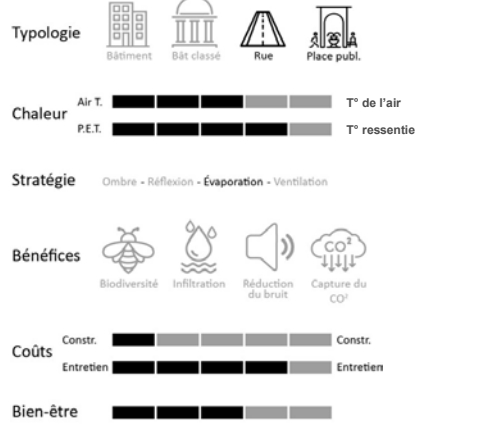


Une fontaine peut aussi émettre de la brume : les gouttelettes des jets d'eau sont transportées sous l'action du vent provoquant ainsi un effet « brumisateurs ».
(Lo Guidice, Marquet, 2008 dans IAU)

Points d'attention

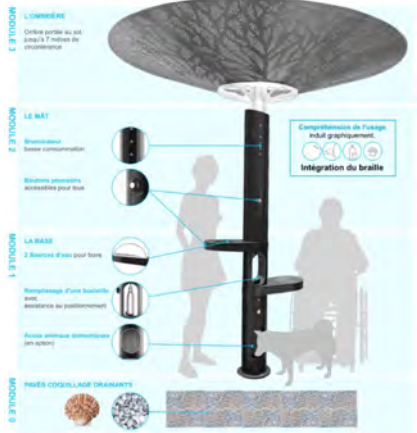
Espace public (EP) et/ou bâti?	EP
Compatible avec impé- trants?	Oui
Prof substrat néces- saire?	Sans objet
Nécessite permis d'urba- nisme?	Non
Intervention légère ou lourde?	Légère
Opportunité de rénova- tion	/
Entretien	Coûteux et complexe
Patrimoine / périmètre?	Pas d'application
Arrosage	Sans objet
Récupération eau plu- viale	Mesure bleue à combiner avec mesure verte pour infiltrer l'eau excédentaire
Risque vandalisme?	Peu élevé
Court terme / moyen / long	Court terme
Budget	Exemple pour le module à droite : En installation pérenne : entre 9000 € et 20.000 € en fonction des modules installés (pavé drainant, ombrière, ...) + 2000 à 5000 € pour l'installa- tion En location : 9.000 € pour 2 mois
Efficacité	Non calculé

Synthèse



Informations complémentaires

- De manière générale, la brumisation est très consommatrice en eau. Réserver cette mesure à des zones vulnérables et limiter l'usage dans le temps.
- Possibilité de rendre la fontaine connectée (pour collec- ter les données à distance, système de pilotage à dis- tance, heures de fonctionnement, mise en hibernage...)
- Possibilité d'ajouter un module d'ombrage
- Possibilité d'ajouter au pied de la fontaine un pavé drainant pour récupérer les eaux perdues (évapotranspiration, augmentation du confort localement)
- Si pas de pavé drainant : prévoir raccord au réseau d'assainissement, ou diriger l'eau vers espace vert à proximité (utiliser la topographie)
- Connecter la fontaine à une arrivée d'eau potable et au réseau électrique
- Possibilité d'installation pérenne (nécessite de sceller une platine dans un massif béton sur laquelle vient s'an- crer la fontaine), ou temporaire (par exemple, usage saisonnier)



Fontaine Mât Source® avec tous les modules © Water Connect

Fontaine Mât Source® à Paris - vasques et bouteille © Alexis Toureau



4 - Eau

4.2 Piscines temporaires

La présence d'eau peut apporter une solution immédiate pour rafraîchir les résidents lors des chaudes journées d'été. Alors que les fontaines sont très chères et consomment beaucoup d'eau, les piscines temporaires peuvent être une alternative moins coûteuse qui peut être déployée pendant les vagues de chaleur.

Rafraîchissement attendu : **non calculé**

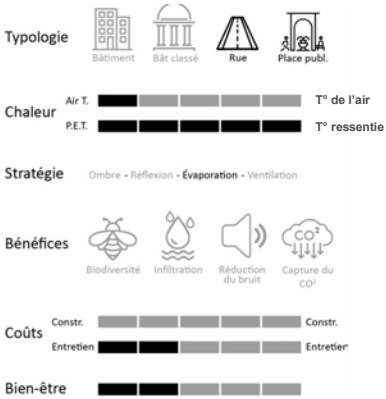


© Nicolas Economou NurPhoto

Points d'attention

Espace public (EP) et/ou bâti?	EP
Compatible avec impé-trants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	Sans objet
Nécessite permis d'urba-nisme?	Non
Intervention légère ou lourde?	Légère
Opportunité de rénovation	/
Entretien	Quotidien
Patrimoine / périmètre?	Pas d'application
Arrosage	Sans objet
Récupération eau pluviale	/
Risque vandalisme?	Peu élevé
Court terme / moyen / long	Court terme
Budget	coût d'achat (piscine gonflable) : 50-250 €, susceptible d'être rem-placé chaque saison.
Efficacité	Non calculé

Synthèse



Informations complémentaires

- La gestion est essentielle, elle doit être suffisante et garantie : contrôle de la qualité de l'eau, entretien de la pompe de circulation et du filtre, apport de chlore, etc.
- Nécessaire : raccordement à l'eau potable et à l'élec-tricité (pompe à filtre).
- Ne peut être utilisé par de jeunes enfants sans surveil-lance.



© Nicolas Economou NurPhoto

New York City kids in a mostly treeless neighborhood in the Bronx cool off in an inflatable pool
© Mario Tama

5 - Façade

5.1 Plantes grimpantes sur façades

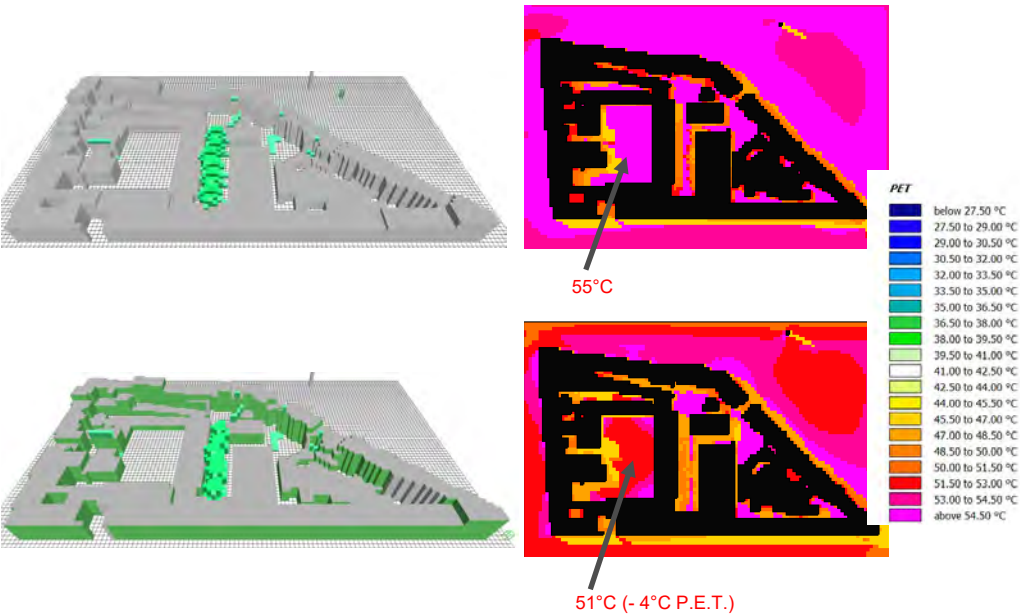
Dans de nombreuses rues, il n'y a tout simplement pas assez d'espace pour mettre des arbres. Les plantes grimpantes sont alors une bonne alternative, car la suppression d'un pavé peut offrir suffisamment d'espace. Le jardin de la façade peut fournir beaucoup d'ombre aux bâtiments et assurer le refroidissement par évapotranspiration. Grâce à des fils (métalliques) ou à des structures, les plantes grimpantes peuvent bénéficier d'un soutien supplémentaire et s'étendre plus loin dans la rue.



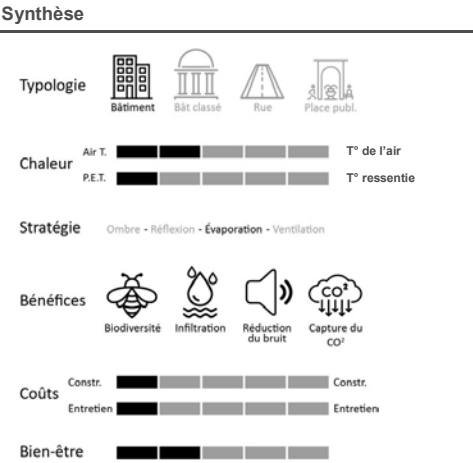
Façade végétalisée sur une structure indépendante de la façade © Yvan Glavie

Rafrâichissement attendu : -4°C P.E.T.

Simulation 19 juillet 2022 à 16h (température de l'air : 40°C) :



Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou Bâti bâti?	
Compatible avec impé- trants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	50 cm (disponibles partout, même sur dalle)
Nécessite permis d'urba- nisme?	Non, s'inscrire via myBXL, les règles de samenvergroe- nen.brussels.be doivent être respectées
Intervention légère ou lourde?	Légère
Opportunité de rénovation	Réno de la façade (+ isolation) et pose treillis ou filets ou câbles sur des plots en alu
Entretien	Taille
Patrimoine / périmètre?	Interdit pour les bâtiments classés
Arrosage	Pas nécessaire hors sécheresse
Récupération eau pluviale	Nécessaire
Risque vandalisme?	Peu élevé
Court terme / moyen long	Moyen terme
Budget	50-500€
Efficacité	-4° PET



Informations complémentaires

- Mesure indiquée pour les rues canyon
- Diagnostic amont : vérifier la possibilité de fixer une ossature métallique sur la façade
- Ravalement de façade au préalable
- Par mesure de précaution, placer une membrane anti racine contre le mur de fondation de la façade.
- Améliore le confort intérieur des bâtiments et diminue la consommation de climatisation
- Permet de dissimuler un mur disgracieux
- Choisir l'espèce en tenant compte du changement climatique (sécheresse) et du contexte (certaines espèces attirent les mouchettes...), demander conseil à un urbaniste pour le choix de l'essence
- Choisir un emplacement qui n'obstruera pas le trafic, le parking, le passage, les câbles d'électricité...
- Privilégier l'enracinement en pleine terre plutôt que des plantes en pots accrochées sur la façade (plus résilient face à la sécheresse)
- Attention au risque d'incendie : certains systèmes d'attache peuvent propager l'incendie + risque accru si les plantes sont sèches (prévoir arrosage efficace). Voir document CSTC avec pistes de solutions « La sécurité incendie : un frein au développement des façades végétalisées ? » (CSTC-Contact 2021/3)
- Privilégier les plantes en pleine terre (lierre et vigne sont très adaptés au milieu urbain et ne nécessitent presque pas de surface pour s'implanter en pleine terre) par rapport aux systèmes type « murs modu- laires », coûteux en apports de nutriments et eau (coûteux en énergie, peu résilient).
- Lierre favorable à la biodiversité, mais très risqué sur des murs maçonnés (dégradation aux maçonneries), en particulier les murs anciens maçonnés à la chaux. On recommande alors de faire pousser la végétation sur un treillis indépendant de la façade.
- Etablir un plan de gestion pour permettre l'entretien dans la durée. Exemple : quid si rotation des loca- taires?



Plante grimpante © Stad Gent

5 - Façade

5.2 Isolation des bâtiments

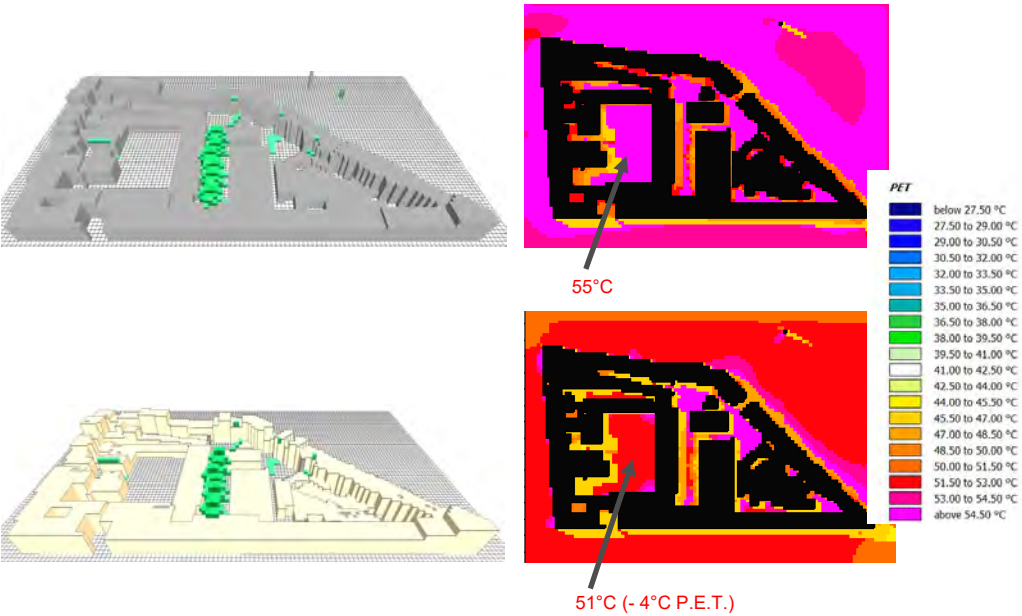
Les matériaux urbains comme la brique ou le béton, ayant une grande inertie thermique, accumulent le rayonnement solaire en journée pour le restituer la nuit, provoquant l'ICU. Une isolation de type « enduit sur isolant » (composée d'une plaque d'isolant sur laquelle est appliquée une fine couche d'enduit) permettra de réduire l'ICU dans le sens où la finition extérieure retiendra très peu la chaleur du rayonnement solaire par exemple par rapport à une brique noire. Cela est dû à la faible capacité thermique du mur, grâce à la fine couche de plâtre posée sur un matériau isolant.



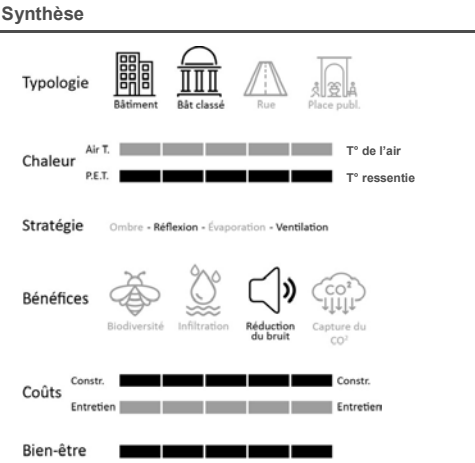
Isolation extérieure de façade (<https://energieplus-lesite.be/>)

Rafrâichissement attendu : **-4°C P.E.T.**

Simulation 19 juillet 2022 à 16h (température de l'air : 40°C) :



Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	Bâti
Compatible avec impé-trants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	Sans objet
Nécessite permis d'urba-nisme?	Oui
Intervention légère ou lourde?	Lourde
Opportunité de rénovation	Rénovation générale du bâtiment : enveloppe, y compris fenêtres, ventilation, système de chauffage, panneaux solaires, ...
Entretien	/
Patrimoine / périmètre?	Si la façade est classée, l'isolation extérieure n'est pas autorisée.
Arrosage	Sans objet
Récupération eau pluviale	Sans objet
Risque vandalisme?	Pas d'application
Court terme / moyen / long	Long terme
Budget	installation d'une isolation exté-rieure avec une nouvelle finition de la façade : entre 150 et 250 €/ m².
Efficacité	-4°C PET



Informations complémentaires

- Utiliser de préférence un isolant durable (béton de chanvre, isolant à base d'herbe, de fibre de bois...)
- Le fait d'isoler le bâtiment favorisera l'effet de serre à l'intérieur, y compris en été. Afin de préserver une température intérieure confortable, il convient de prévoir des protections solaires extérieures pour les fenêtres.
- Améliore le confort intérieur des bâtiments et diminue la consommation de chauffage

6 - Toitures

6.1 Toitures vertes

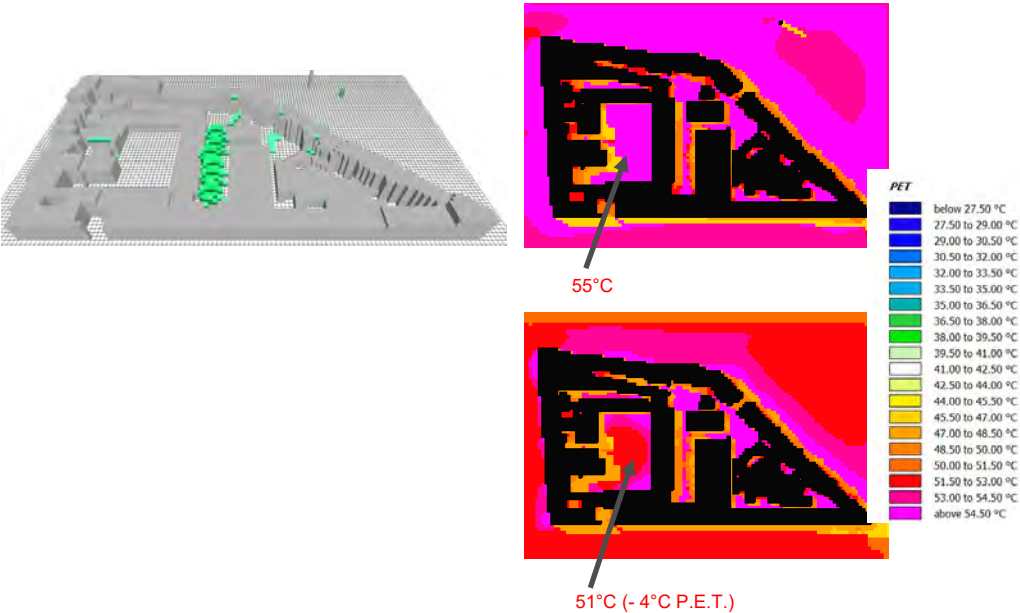
Il existe trois types de toitures vertes, en fonction de l'épaisseur de substrat : la toiture extensive a l'épaisseur de substrat la plus mince (6 cm). Les possibilités de végétations sont limitées aux plantes de type sédums, et le pouvoir rafraîchissant est très faible. Ensuite, les toitures semi-intensives (10 à 30 cm de substrat) et intensives (plus de 30 cm de substrat) permettent, elles, de planter des arbustes et petits arbrisseaux et sont beaucoup plus intéressantes d'un point de vue microclimatique.



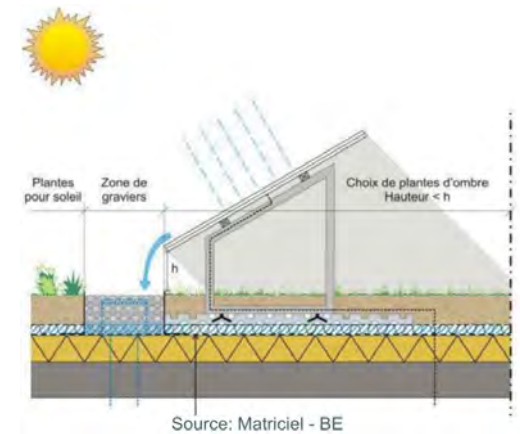
<https://www.guidebatimentdurable.brussels>

Rafrâichissement attendu : -4°C P.E.T.

Simulation 19 juillet 2022 à 16h (température de l'air : 40°C) :



Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	Bâti
Compatible avec impé-trants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	Sans objet
Nécessite permis d'urba-nisme?	si l'installation d'un toit vert néces-site le renforcement de la struc-ture du toit ou la surélévation des montants du toit, les travaux sont soumis à l'obtention d'un permis. Le RRU stipule que tous les toits plats d'une superficie >100m² doivent obligatoirement être con-çus comme des toits verts.
Intervention légère ou lourde?	Lourde
Opportunité de rénovation	Isolation et remise en état de la toiture, panneaux solaires, rendre la toiture accessible, récup EP,...
Entretien	Prévoir contrat d'entretien régulier et adapté
Patrimoine / périmètre?	Selon le type de classement / protection du patrimoine
Arrosage	Toiture extensive : pas besoin d'arrosage. Toiture intensive : besoin d'arro-sage important.
Récupération eau pluviale	Les toitures vertes font partie des solution de gestion des EP
Risque vandalisme?	Non
Court terme / moyen / long	Moyen terme
Budget	entre 50 € (toit vert extensif) et 250 € par m² (toit vert intensif)
Efficacité	-4°C PET



Synthèse

Typologie

Bâtiment Bât classé Rue Place

Chaleur

Air T. T° de l'air

P.E.T. T° ressentie

Stratégie

Ombre • Réflexion • Évaporation • Ventilation

Bénéfices

Biodiversité Infiltration Réduction du bruit Capture du CO2

Coûts

Constr. Entretien

Bien-être

- ### Informations complémentaires
- Diagnostic amont : vérifier les charges admissibles du bâtiment
 - Améliore le confort intérieur des bâtiments et diminue la consommation de climatisation
 - Types de toitures vertes :
 - Toiture verte extensive = emballage mince et léger (environ 60 mm - 50 kg/m²), convient à la plupart des toits, couche mince de substrat avec végétation de sé-dum. Le pouvoir tampon de l'eau (20l/m²) et l'inertie thermique sont limités.
 - Toiture verte semi-intensive : épaisseur du substrat : de 10 à 30 cm ; charge pondérale : de 100 à 400 kg/ m² ; croissance d'arbustes et de petits arbrisseaux,
 - Toiture verte intensive : épaisseur du substrat : plus de 30 cm ; charge pondérale : plus de 400 kg/m² ; croissance d'une couche d'arbustes plus importante, voire d'une couche d'arbres
 - Compatibles avec panneaux solaires photovoltaïques (attention dans ce cas à laisser de l'espace pour la végé-tation entre les panneaux, et que les panneaux soient suffisamment surélevés pour que la végétation ne leur porte pas d'ombre). La végétation diminuera la tempé-rature de surface de la toiture et assurera ainsi un meilleur rendement aux panneaux.

Voir aussi comparaison toiture verte / blanche page 64

6 - Toitures

6.2 Toitures blanches

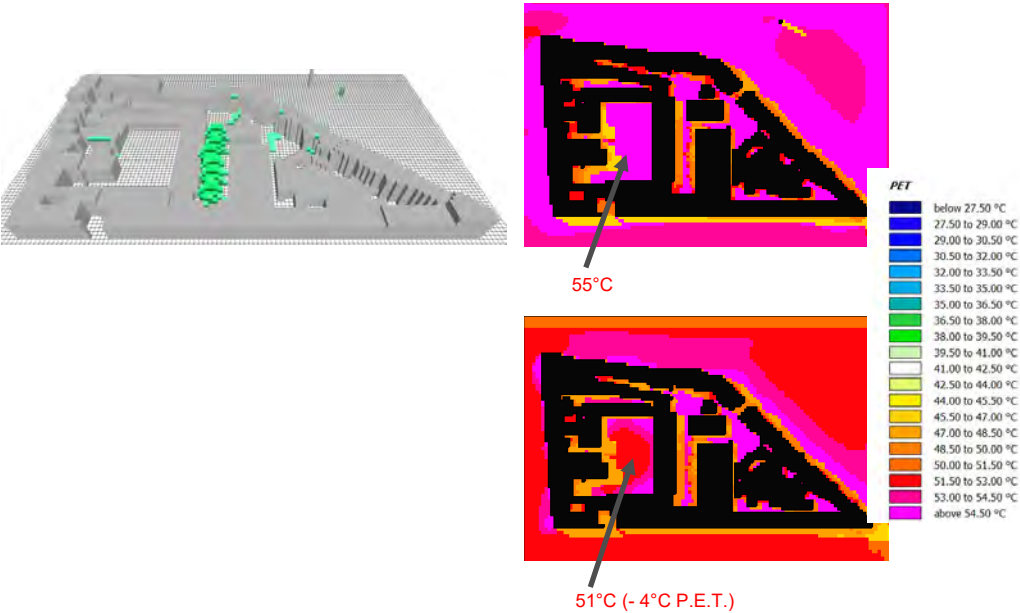
Une solution relativement facile à mettre en œuvre est de peindre les toitures d'une peinture blanche, qui réfléchit les rayons du soleil vers le ciel et limite ainsi l'échauffement de la toiture.



<https://leshorizons.net/>

Rafrâichissement attendu : -4°C P.E.T.

Simulation 19 juillet 2022 à 16h (température de l'air : 40°C) :



Points d'attention	
Espace public (EP) et/ou bâti?	Bâti
Compatible avec impé-trants?	Oui
Prof substrat nécessaire?	Sans objet
Nécessite permis d'urba-nisme?	Oui
Intervention légère ou lourde?	Légère
Opportunité de rénovation	Isolation et remise en état de la toiture, panneaux solaires, rendre la toiture accessible, récup EP,...
Entretien	Nettoyage annuel pour préserver les propriétés réfléchives de la toiture (0.5 €/m²)
Patrimoine / périmètre?	Si toit plat pas d'objection
Arrosage	Sans objet
Récupération eau pluviale	Sans objet
Risque vandalisme?	Non
Court terme / moyen / long	Moyen terme
Budget	80-200€/m²
Efficacité	-4°C PET

Synthèse	
Typologie	 Bâtiment  Bât classé  Rue  Place publ.
Chaleur	Air T.  T° de l'air P.E.T.  T° ressentie
Stratégie	Ombre • Réflexion • Évaporation • Ventilation
Bénéfices	 Biodiversité  Infiltration  Réduction du bruit  Capture du CO ₂
Coûts	Constr.  Constr. Entretien  Entretien
Bien-être	

- ### Informations complémentaires
- Privilégier un revêtement biosourcé
 - Améliore le confort intérieur des bâtiments au dernier étage et diminue la consommation de climatisation
 - Bâtiment neuf : privilégier une membrane d'étanchéité en EPDM (Éthylène Propylène Diène Monomère), de couleur blanche. L'EPDM peut aussi recouvrir un bâtiment existant.
 - Empreinte écologique : certaines peintures "cool" contiennent des métaux (à éviter).
 - Compatible avec panneaux photovoltaïques (la température de la toiture, plus basse, améliorera le rendement des panneaux).

Analyse transversale

Sur base des fiches mesure précédentes, quelles conclusions générales peut-on tirer sur les mesures d'atténuation ? Y a-t-il des mesures à privilégier ? Certaines mesures sont-elles inefficaces ? Quelles sont les limites de l'analyse menée dans ce chapitre ? Commençons par une vue générale de toutes les mesures mises côte à côte sous forme de tableau récapitulatif.

			Sous-sol		Urbanisme		Type d'intervention			Entretien		Eau		Coût		Efficacité			Stratégie de réduction de la température		Cobénéfices						
			Nécessité dévoilement des impétrants	Profondeur substrat	Nécessité PU	Patrimoine	Intervention lourde / légère	Temporalité	Opportunité de rénovation	Entretien	Risque vandalisme	Arrosage	Intégration GIEP	Coût Installation	Coût Entretien	Impact PET diurne	Impact T° nocturne	Zone utilisée pour la simulation	Zone d'impact	Ombre	Réflexion	Evaporation	Ventilation	Biodiversité	Infiltration	Réduction du bruit	Capture CO2
Type	Mesure																										
ESPACE PUBLIC	1. Ombre	1.1 Voiles (rues)	Non	s.o.	Oui	PU si < 10m	Légère	Court terme	/	Faible maintenance ponctuelle	Non	Non	Non			-10°C PET	N/A	Zone 3 Athénée	Très locale	V	V						
		1.2 Tentes	Non	s.o.	Oui	PU si < 10m	Légère	Court terme	/	Faible maintenance ponctuelle	Oui	Non	Non			-10°C PET	N/A	Idem point 1.1 (Zone 3)	Très locale	V	V						
	2. Végétation	2.1 Arbres	Oui	1.5 m	Non ⁽¹⁾	PU si < 10m	Lourde	Long terme	Revêtement et sous-sol, GIEP	Elagage, suivi phytosanitaire	Non	Quand sécheresse	Oui			-10°C PET	Oui	Zone 3 Athénée	Etendue	V	V	V	V	V	V	V	V
		2.2 Jardinières surélevées	Non	0.4 m	Non ⁽¹⁾	Ok	Légère	Moyen terme	/	Arrosage, suivi phytosanitaire	Non	Nécessaire	Non			-10°C PET	Oui	Idem point 2.1 (Zone 3)	Très locale		V	V	V	V	V	V	V
		2.3 Plantes grimpantes sur structure	Non	0.5 m	Oui	PU si < 10m	Légère	Moyen terme	/	Arrosage, suivi phytosanitaire	Non	Quand sécheresse	Oui			-10°C PET	Oui	Idem point 2.1 (Zone 3)	Très locale					V	V	V	V
		2.4 Forêt mobile	Non	s.o.	Non	Ok	Légère	Court terme	/	Arrosage, suivi phytosanitaire	Peu élevé	Nécessaire	Non			-10°C PET	Oui	Idem point 2.1 (Zone 3)	Très locale	V	V	V	V		V	V	V
	3. Perméabilité	3.1 Buissons, herbes hautes	Non	0.5 m	Non ⁽¹⁾	Ok	Lourde	Moyen terme	Revêtement et sous-sol, GIEP	Taille, suivi phytosanitaire	Peu élevé	Quand sécheresse	Oui			0 à -5°C PET	Oui	Réf autres études	Locale		V	V	V	V	V	V	V
		3.2 Jardins de pluie	Oui	0.5 m	Oui	PU si < 10m	Lourde	Long terme	Revêtement et sous-sol, GIEP	Fauche 1 à 2 fois/an et maintenance	Non	Non	Oui			0 à -5°C PET	Oui	Réf autres études	Locale	V	V	V	V	V	V	V	V
		3.3 Dérminéralisation	Non	s.o.	Oui	Ok	Lourde	Long terme	Revêtement et sous-sol, GIEP	Dépend du revêtement	Non	Non	Oui			0 à -5°C PET	Oui	Réf autres études	Etendue					V		V	
	4. Eau	4.1 Brumisateurs	Non	s.o.	Non	Ok	Légère	Court terme	/	Couteux et complexe	Peu élevé	Non	Non			Non calculé	N/A	N/A	Très locale								
4.2 Jeux d'eau		Non	s.o.	Non	Ok	Légère	Court terme	/	Quotidien	Peu élevé	Non	Non			Non calculé	N/A	N/A	Très locale					V				
BÂTI	5. Bâtiments - Façades	5.1 Plantes grimpantes sur façades	Non	0.5 m	Non	NOK	Légère	Moyen terme	Réno façade et isolation	Taille, suivi phytosanitaire	Peu élevé	Quand sécheresse	Oui			+4 PET	Oui	Zone 4 Ilot Van Gulick	Locale					V	V	V	V
		5.2 Isolation	Non	s.o.	Oui	NOK	Lourde	Long terme	Réno bâtiment entier	/	Non	Non	Non			+4 PET	Oui	Zone 4 Ilot Van Gulick	Locale		V					V	
	6. Bâtiments - Toitures	6.1 Toitures vertes	Non	s.o.	Non ⁽¹⁾	NOK	Lourde	Moyen terme	Réno et isolation toiture	Régulier (prévoir contrat)	Non	Non ⁽²⁾	Oui			+4 PET	Oui	Zone 4 Ilot Van Gulick	Locale					V	V		
		6.2 Toitures blanches	Non	s.o.	Oui	NOK	Légère	Moyen terme	Réno et isolation toiture	Nettoyage annuel	Non	Non	Non			+4 PET	Oui	Zone 4 Ilot Van Gulick	Locale		V						

(1) Permis d'urbanisme non requis si intervention de petite envergure. Pour les toitures vertes, un permis sera nécessaire si la structure portante de la toiture doit être renforcée.

(2) Dépend du type de toiture verte: arrosage nécessaire si toiture intensive ou semi-intensive (c'est-à-dire si substrat > 10 cm)

Remarque :
• Les mesures liées à la perméabilité du sol n'ont pas pu être évaluées par les simulations, d'abord parce que la journée testée (19 juillet 2022) faisait suite à un grand épisode de sécheresse (rappelons que seul un sol perméable humide permet de rafraîchir l'air), et ensuite par ce que ce type de mesure est fortement dépendant de l'état d'humidité du sol. L'efficacité est donc très variable dans le temps. Certaines études avancent une efficacité allant de 0 à 5°C PET.

Efficacité : Choix de l'indicateur

Dans les fiches mesure, l'efficacité est définie comme étant le gain en °C PET (température ressentie) lors d'un pic de chaleur à l'heure la plus chaude de l'après-midi, une journée caniculaire où la T° de l'air a atteint 40°C. Le confort thermique dépend de la température de l'air, la température des parois à proximité de l'usager (murs, sol...), la vitesse du vent, le rayonnement solaire (et donc le fait d'être à l'ombre ou pas), ainsi que d'autres paramètres liés à l'usager (vêtements, activité, métabolisme...).

Certains paramètres n'ont pas été modélisés, comme l'humidité du sol et les précipitations. En effet, la journée choisie pour tester l'efficacité des mesures faisait suite à une longue période de sécheresse, et l'humidité du sol était probablement très faible à ce moment et procurait peu, voire pas de rafraîchissement.

Notons que le choix de l'indicateur peut influencer les conclusions. L'indicateur que nous avons choisi ici permet de répondre à la question : « **lors d'un après-midi caniculaire, si je suis à l'extérieur, comment me rafraîchir le plus efficacement** » ? La réponse la plus adaptée est « à l'ombre, près d'une source d'eau ». Les conclusions auraient peut-être été différentes si nous avions considéré le confort nocturne (ICU), le confort à l'intérieur des bâtiments, ou le confort diurne moyen sur l'été entier.

Efficacité : Zone de simulation

Pour les mesures 5.1 à 6.2 (liées aux **bâtiments**), des simulations spécifiques ont été réalisées.

L'efficacité des mesures **d'ombrage** (1.1 et 1.2) a été estimée sur base de simulations. Des voiles d'ombrage ont été proposés dans la rue. L'effet mesuré localement sous ces dispositifs a été évalué à -10°C PET. L'effet de la végétalisation de la cour d'école voisine sur la température ressentie dans la rue sous les voiles d'ombrage a été jugé négligeable.

L'effet des mesures **végétales** (2.1 à

2.4) a été évalué, mais au sein de la cour de récréation où ont été implantées de nombreux arbres et arbustes. La végétation dense crée un ombrage généreuse au niveau du piéton, dont l'efficacité a été évaluée à -10°C, tout comme l'ombre portée par les voiles dans la rue. C'est donc bien l'efficacité de la végétation suffisamment haute *portant de l'ombre* que l'on mesure ici.

Existe-t-il une « rentabilité » ?

On serait tenté de faire correspondre le coût des mesures par rapport aux degrés gagnés. Cette approche permettrait de comparer l'efficacité des mesures entre elles, en €/°C.

En pratique, cela est compliqué pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'efficacité en terme de °C renseigné ici est à prendre avec recul ; elle est propre à un site pilote et donc à un contexte urbain et il serait délicat de la généraliser. Pour les mesures de végétalisation, elle dépend de la transparence de la canopée, de l'humidité du sol... qui sont variables dans le temps et seront donc différentes d'un jour à l'autre.

Ensuite, certaines mesures auront un effet très local (voiles d'ombrage) et d'autres auront un effet plus étendu (façades végétales), ce qui les rend difficilement comparables.

Le coût est également à relativiser ; la mise en place de certaines mesures peuvent nécessiter des travaux importants qui ne sont pas non plus pris en compte. Certaines mesures, temporaires, auront un coût mensuel et d'autres mesures, permanentes, auront un coût fixe puis un coût d'entretien. On note également une fourchette de coût très importante pour une même mesure (par exemple, un arbre peut coûter entre 25 € et 1000 €).

Pour toutes ces raisons, il serait trop simpliste d'attribuer un chiffre de rentabilité pour comparer les mesures d'atténuation entre elles.

Y a-t-il des mesures très efficaces ?

Pour l'indicateur choisi, les mesures les plus efficaces sont celles qui procu-

rent de **l'ombre** (-10°C PET), ainsi que les mesures liées à **l'eau**, comme la brumisation et les jeux d'eau (les fontaines peuvent aussi rentrer dans cette catégorie). En effet, lors d'une journée caniculaire, on recherche principalement l'ombre et l'eau. Ces deux facteurs seront des éléments constitutifs de l'îlot de fraîcheur, comme expliqué ci-après (p.134).

Ici, l'ombre procurée par une mesure non-végétale (voile d'ombrage...) a autant d'impact qu'une mesure végétale (arbres, plantes grimpantes...). N'oublions pas que les **arbres**, lorsque le sol est suffisamment humide, vont avoir un effet beaucoup plus important qu'un simple voile grâce à l'évapotranspiration. Ils permettront de rafraîchir l'air en se comportant comme de véritables climatiseurs et pourront avoir un effet sur la température de l'air de manière continue, même en période nocturne, ce qui n'est pas le cas des voiles d'ombrage. Ils peuvent également créer ou accentuer le phénomène de brise thermique (p.106). Les **buissons, herbes et plantes grimpantes** ont également un effet favorable en soirée et la nuit car ces surfaces vont, si le sol est suffisamment humide, moins s'échauffer sous le rayonnement solaire, et se rafraîchir très vite après le coucher du soleil. Leur potentiel d'évapotranspiration est par contre moindre que celui des arbres.

Ne négligeons pas non plus la **perméabilité des sols**. En effet, lorsque le sol est humide, la température de surface peut être jusqu'à 6°C inférieure à celle d'un sol imperméable et sec. Cet effet est d'autant plus important après une averse et durera d'autant plus longtemps que le sol sera capable de retenir l'eau de manière durable dans le temps.

Y a-t-il des mesures qui ne sont pas efficaces ?

Les mesures touchant au **bâtiment** (toitures et façades vertes et blanches, isolation thermique) sont décrites dans certaines études comme ayant une influence négligeable sur l'ICU. Ici, nous avons calculé un gain de 4°C sur

la température ressentie lors d'une journée chaude, ce qui est peut-être moins efficace que d'autres mesures, mais pas négligeable pour autant, surtout si elles sont **combinées** avec d'autres mesures qui renforceraient leur effet.

Notons également que l'effet de ces mesures sur le bâtiment ont un impact très positif sur le **confort intérieur** et leur consommation en refroidissement s'ils sont climatisés. Une façade ou une toiture verte/blanche/isolée aura d'autant plus d'impact que l'ensoleillement sur cette surface est important (il n'y aura par contre pas d'effet notable si le bâtiment est à l'ombre la majeure partie du temps).

Les **herbes, buissons et la perméabilité du sol** n'ont qu'un effet très limité en terme d'amélioration du confort thermique lors d'une journée chaude : ils ne procurent pas d'ombre et leur évapotranspiration dépend fortement de la quantité de pluie tombée les derniers jours. Ils sont par contre très intéressants pour préserver l'humidité dans le sol après une averse, et peuvent restituer leur humidité peu à peu au fil des heures et jours qui suivent, ce qui va rafraîchir l'air. Ces mesures auront donc une efficacité qui dépendra des précipitations, mais qui n'est pas négligeable pour autant. Elles sont de plus complémentaires aux arbres qui s'épanouiront mieux s'ils sont entourés des strates herbacées et buissonnières et d'un revêtement perméable.

Matériaux réfléchissants ou blancs

Il existe aujourd'hui sur le marché de nombreux matériaux « réfléchissants ». Ces matériaux requièrent une certaine prudence dans leur application et leur réelle plus-value reste à démontrer. De plus, il est difficile d'évaluer leur énergie grise car l'empreinte carbone est rarement renseignée dans la documentation technique. Précisons également que ces revêtements ne sont utiles que sur des surfaces ensoleillées, et qu'elles rendent les surfaces imperméable, ce qui va à l'encontre de la tendance à désimpermeabiliser les sols urbains. Certaines études sur

l'effet d'îlot de chaleur urbain déconcentrent ces mesures dû à leur manque d'efficacité.

Sur les murs ou comme revêtement de sol

Il a été démontré (Fahed, 2018) qu'un revêtement blanc au niveau des murs d'une rue canyon peut aggraver l'ICU car les rayons solaires sont réfléchis successivement d'une façade à l'autre et, même si les murs sont moins chauds, l'air, lui, est plus chaud que s'il n'y avait pas eu d'intervention sur la façade, à cause du piégeage du rayonnement solaire. Le confort thermique du piéton est lui aussi détérioré car il est exposé à une plus grande réflexion solaire émanant du mur ou du sol réfléchissant. De plus, la couleur blanche peut provoquer de l'éblouissement.

En toiture, par contre, un revêtement blanc est indiqué. En effet, les rayons solaires sont cette fois réémis vers l'atmosphère (et non piégés entre des murs), et la toiture s'échauffe moins. L'avantage principal des toitures blanches réside dans l'amélioration du confort thermique du dernier étage du bâtiment, ainsi que dans la diminution de la consommation en climatisation.

Toiture verte ou toiture blanche ?

L'effet des toitures vertes/blanches sera d'autant plus important que la proportion de toitures plates est importante dans le quartier (une toute petite toiture n'aura pas d'effet à l'échelle macroscopique). L'effet sera par contre important en terme de confort intérieur et de consommation de climatisation au dernier étage du bâtiment.

Phénomène physique à la surface

La toiture blanche (albédo faible) réfléchit les rayonnements solaires de manière 3 fois plus efficace qu'une toiture verte (albédo moyen). Une toiture verte aura par contre une certaine capacité d'évapotranspiration qui rafraichira le toit après une pluie. Les phénomènes physiques qui interviennent sont différents et leurs importances dépendent du climat (plus ou moins ensoleillé, plus ou moins humide).

Importance de l'isolation

Avant de peindre la toiture en blanc, ou avant d'y déposer le substrat et la végétation, il est possible de l'isoler. L'isolant jouera un rôle au point de vue de la réaction thermique de la toiture.

Sans isolant :

Le matériau sous la couche blanche ou verte sera du béton, matériau lourd capable d'accumuler la chaleur. La chaleur emmagasinée la journée sera lentement restituée à l'atmosphère le soir et la nuit, la toiture restera chaude longtemps après le coucher du soleil.

Avec isolant :

Le matériau sous la couche blanche ou verte sera un isolant (place au-dessus de la toiture en béton), matériau léger donc incapable de stocker la chaleur. L'isolant se refroidit donc immédiatement dès qu'il n'est plus ensoleillé. La toiture se rafraichira rapidement le soir venu.

La surface de la toiture (blanche ou verte) agit comme capteur d'énergie solaire, et le matériau juste en-dessous (isolant ou béton) comme réservoir de chaleur.

Notons qu'il est déconseillé d'apposer une toiture verte sans isolation dans un bâtiment chauffé.

Effet sur le bâtiment

L'effet le plus bénéfique pour le bâtiment (confort thermique au dernier étage et consommation de climatisa-

tion), le plus intéressant est d'isoler la toiture. Le fait d'apposer une étanchéité blanche par-dessus ou une toiture végétalisée n'aura alors pas une grande influence.

Effet sur l'ICU

Pour réduire l'ICU, l'optimum est de combiner **isolation** de la toiture et d'y apposer une couche blanche ou végétale. La Belgique ayant un climat plutôt humide, la **toiture verte** aura un effet rafraichissant plus important que la toiture blanche (qui, elle, sera plus adaptée à un climat fortement ensoleillé et sec). La toiture verte est en outre plus intéressante en termes de biodiversité et de rétention d'eau pluviale.

La toiture verte est donc sous nos latitudes plus intéressantes pour atténuer l'ICU que la toiture blanche. Quel que soit le type de toiture, l'isolation a un effet favorable tant sur le confort du bâtiment que sur l'ICU.

Notons qu'une toiture blanche ou couverte de végétation sera plus fraîche qu'une toiture noire, et permettra donc d'augmenter le rendement des panneaux solaires photovol-

Faut-il absolument planter des arbres partout ?

Les arbres, et la végétation de manière générale, sont souvent préconisés pour faire face aux vagues de chaleur. Cela est tout à fait correct, mais il est parfois difficile d'implanter des arbres en milieu urbain. Les arbres ont besoin d'espace, tant pour leur couronne que pour leurs racines, de soleil, d'eau, de nutriments, de sol de qualité... (voir partie 3 « L'arbre en ville »). Les seuls critères d'espace et d'ensoleillement réduisent déjà fortement les possibilités. Dans l'image ci-contre, les arbres d'alignement vont être abattus car ils atteignent une taille disproportionnée par rapport à la largeur de la rue. Une analyse d'ensoleillement d'une rue étroite (p.127) montre également que l'ensoleillement n'atteint pas toujours le fond du « canyon ». Le croisement entre une étude d'ensoleillement et l'identification des rues selon leur largeur (exemple de Paris ci-contre) permettrait déjà, à un niveau macroscopique, d'écarter d'emblée certaines rues. Une identification des dalles souterraines (parkings souterrains, métro, urbanisme de dalle...) serait également utile pour écarter certains emplacements.

Ensuite, lorsqu'un endroit propice a été identifié, il convient de penser à donner aux arbres les meilleures conditions de vie possibles, à savoir un sol riche en nutriment, décompacté, un apport en eau pluviale, l'implantation d'autres strates (buissons, herbes hautes...), ainsi que d'instaurer une cohabitation harmonieuse avec les réseaux souterrains (p.78). Tout cela peut mener à des travaux importants mais nécessaires pour que les plantations soient durables dans le temps. Il est également nécessaire de budgétiser l'arrosage des arbres en période de sécheresse (p.70) (dont le coût peut être fortement réduit par le recours à des essences d'arbres qui supportent bien la sécheresse, quitte à opter pour des espèces non indigènes).

Là où des arbres ne peuvent être plantés, il ne faut pas sous-estimer d'autres solutions très efficaces comme des plantes grimpantes sur



A l'âge adulte, ces arbres ont atteint une dimension incompatible avec la volumétrie de la rue, l'arbre cherchant à esquisser les façades pour trouver davantage de lumière (poiriers d'alignement, rue Rabelais à Angers, Gouédard 2014).



Identification des rues selon leur largeur (exemple pour Paris). Source : APUR.

pergola. Les buissons, herbes et fleurs constituent également une excellente alternative.

	Toiture blanche Isolée	Toiture blanche Non isolée	Toiture verte Isolée	Toiture verte Non isolée (uniquement pour bâtiment non chauffé)
Surface	Blanc Réflexion	Blanc Réflexion	Végétation Evaporation	Végétation Evaporation
Matériau sous la surface	Isolant N'accumule pas la chaleur	Béton Réservoir de chaleur	Isolant N'accumule pas la chaleur	Béton Réservoir de chaleur
Effet sur le bâtiment au dernier étage (confort thermique estival, consommation climatisation)	+++ L'isolation rend le bâtiment relativement indépendant de la température de surface (blanche ou verte ou autre)	+/- La surface blanche s'échauffera moins (moins de surchauffe estivale et moins de clim... mais plus de consommation de chauffage en hiver !)	+++ L'isolation rend le bâtiment relativement indépendant de la température de surface (blanche ou verte ou autre)	Sans objet
Effet ICU	++ L'effet sera d'autant plus favorable que le climat est ensoleillé	+	++ L'effet sera d'autant plus favorable que le climat est humide	+

3

L'arbre en ville

Ce chapitre porte sur les spécificités de la plantation d'arbres en milieu urbain ; il a été rédigé sur base des questions soulevées lors des réunions d'étude. Il ne prétend pas être un document exhaustif de mise en œuvre, mais vise plutôt à sensibiliser le lecteur sur les questions à se poser lors d'un projet d'aménagement, et propose quelques pistes de solutions.



Quais de la Seine © Ville de Paris—Apur—Céline Orsingher



Opéra Garnier © Ville de Paris—Apur—Céline Orsingher



Hôtel de ville de Paris © Ville de Paris—Apur—Céline Orsingher



Parvis Sainte-Gudule Sint-Goedelevoorplein



Bd Roi Albert II Koning Albert II laan



Parc Roval Warandepark

Effet rafraîchissant

Ombre et évapotranspiration

La végétation a un impact important sur le climat urbain, par l'intermédiaire de différents phénomènes physiques. Le premier est l'**évapotranspiration** : les plantes (herbes, buissons, arbres...) émettent de la vapeur d'eau dans l'air par transpiration lors de la photosynthèse ou sous l'effet d'un stress thermique. Cette évaporation rafraîchit l'air à proximité, c'est pourquoi on qualifie parfois la végétation de climatiseur passif. Ensuite, les arbres créent de l'**ombre** et améliorent ainsi le confort thermique extérieur. Les zones ombragées la journée accumuleront moins de chaleur solaire la journée et seront donc plus fraîches aussi la nuit.

Ombre

L'effet rafraîchissant d'un arbre provient entre autres de l'**ombre** qu'il procure et dépend donc de la densité des feuilles (surface foliaire) et de son étendue, comme illustré ci-dessous.

On observe qu'une avenue plantée de platanes présente 10°C en moins qu'une autre avenue plantée de sophoras, en raison de la transparence de la canopée plus importante de ces derniers (60% de transparence pour les sophoras contre 20% pour les platanes).

essences	platane	marronnier	érable	tilleul	sophora
hauteurs	25 à 30 m	25 à 30 m	10 à 15 m	15 à 20 m	15 à 20 m
« silhouette de la canopée (lorsque l'arbre est jeune) »					
« transparence de la canopée »	20 %	20 %	40 %	40 %	60 %



Tableau comparatif de l'effet rafraîchissant de différentes espèces d'arbres, en fonction de la transparence de la canopée et de sa morphologie (Bigorgne et Mangold 2014 dans Hirsch 2017) (à gauche) et transparence de la canopée (<https://plusfraichemaville.fr>) (à droite).

Evapotranspiration

Le potentiel d'**évapotranspiration** aura également un effet rafraîchissant, car en transpirant, les feuilles rafraîchissent l'air grâce au phénomène de rafraîchissement adiabatique : les molécules d'eau à la surface des feuilles, pour s'évaporer, vont puiser l'énergie de l'air et donc le refroidir. Les feuillus, par exemple, peuvent émettre jusqu'à 400 litres d'eau par jour (en supposant que le sol soit humide et peut lui procurer cette eau), ce qui représente une puissance de refroidissement équivalente à celle de 5 climatiseurs pendant 20 heures.

IMPORTANCE DE LA RECUPERATION DE L'EAU PLUVIALE

La plantation d'arbre ou de tout type de végétaux doit impérativement s'accompagner d'une stratégie d'**apport en eau pluviale**. Ceci sera déterminant pour garantir l'effet rafraîchissant par évapotranspiration (qui serait très limitée en cas de sol sec), mais également pour la simple survie des espèces végétales dans un contexte de changement climatique où les périodes de **sécheresse** deviendront plus intenses et fréquentes.

Sécheresse

Résilience

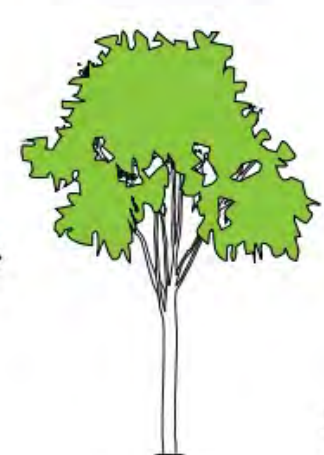
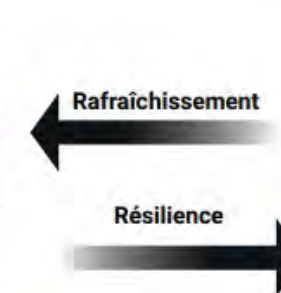
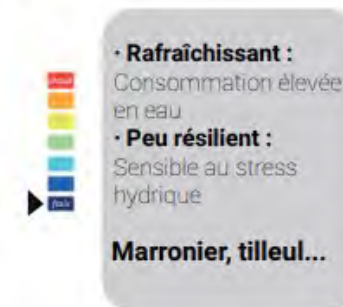
Résilience face à la sécheresse

En cas de stress hydrique, les plantes adoptent diverses stratégies pour survivre. Par exemple, les plantes grasses accumulent des réserves d'eau dans leurs feuilles épaisses et vont donc moins transpirer sous l'effet de la chaleur. Elles sont donc plus résistantes aux vagues de chaleur et à la sécheresse, mais ont un effet rafraîchissant moins important. C'est également le cas des conifères. Un arbre ne peut donc pas être à la fois rafraîchissant et résilient.

Trouver des alternatives

Certaines mesures permettent de rendre un arbre plus résilient à la sécheresse, comme le fait de laisser le plus de place possible pour que ses **racines puissent s'étendre** sur une grande surface, faire **communiquer les fosses** s'il y a plusieurs arbres, ainsi que **désimperméabiliser** les sols à proximité des arbres afin de leur garantir un apport en eau pluviale suffisant. Le fait de planter **différentes strates de végétation** (herbes hautes, buissons et arbres) augmente la résilience du sol et préserve mieux son humidité.

Mais ce ne sont pas des solutions miracles. Il convient également de réfléchir à l'**essence** des arbres à planter, sachant que l'arbre qu'on plante aujourd'hui sera adulte à 80 ans, c'est-à-dire en 2100, et que les experts prévoient que la ville de Bruxelles aura le climat alors d'une ville comme Dijon. Il faut également veiller à assurer l'**arrosage** des arbres comme abordé à la page suivante.



Arbres rafraîchissants mais peu résilients versus arbre peu rafraîchissant mais résilient au stress hydrique (source : © Apur)

Arrosage

L'augmentation de la population d'arbres en ville ne peut se faire sans aborder la question de l'eau. En effet, ces dernières années ont montré à quel point les épisodes de sécheresse peuvent (déjà) être intenses, et selon les prévisions du GIEC, cette tendance ne fera que s'accroître. En cas de sécheresse, les stratégies basées sur la récupération de l'eau pluviale ne sont plus suffisantes ; l'arrosage devient nécessaire. Le volume d'eau nécessaire à l'arrosage sera colossal. Il convient d'y réfléchir dès maintenant.

Arrosage

En période de sécheresse, la stratégie de récupération de l'eau pluviale n'est pas suffisante pour garantir la bonne hydratation de l'arbre. En plus de souffrir de soif, plusieurs risques se présentent pour l'arbre. D'abord, la sécheresse affaiblit son système immunitaire et celui-ci devient **plus vulnérable aux maladies, parasites et insectes**. Ensuite, un arbre sec peut constituer un danger car des **branches sèches, devenues cassantes, voire l'arbre entier, peuvent tomber** soudainement et endommager les installations à proximité, voire représenter un risque important pour la sécurité des passants. Ce danger est particulièrement présent lorsqu'une tempête fait suite à une période de sécheresse. Que ça soit à cause de maladies ou pour protéger les piétons, de nombreux arbres doivent souvent être abattus suite à un épisode de sécheresse.

Il est donc important :

- **d'arroser les arbres**, même si ceux-ci sont déjà adultes et sevrés. Cela représente une quantité d'eau (et donc un budget) importante, surtout s'il s'agit d'une espèce peu résistante à la sécheresse (épicéas, hêtres, ...).
- D'opter pour des **essences** résistantes à la sécheresse pour les nouvelles plantations.

Collaboration avec les pompiers

A titre d'exemple, à Aix-la-Chapelle, l'arrosage en période de sécheresse

est partiellement pris en charge par les pompiers. Cela a évité en 2022 la chute d'arbres durant la tempête qui a suivi l'épisode de sécheresse, contrairement à la ville de Liège où de nombreux arbres sont tombés, occasionnant le décès de plusieurs personnes.

Arrosage intelligent

Certaines expériences montrent à quel point l'arrosage peut être consommateur d'eau. Il convient donc de se questionner sur la pertinence de mettre en places un système d'arrosage intelligent et économe en eau. La Ville de Paris a mis en place une Méthode d'Irrigation Raisonnée (MIR), basée sur l'analyse statistique des données météorologiques et tient compte des particularités du terrain : qualité du sol, types de surfaces, enracinement des végétaux, besoin d'entretien... grâce à des sondes capables de mesurer le stress hydrique des végétaux, elle permet d'apporter l'eau nécessaire, au plus juste des besoins, le tout étant piloté par un ordinateur.

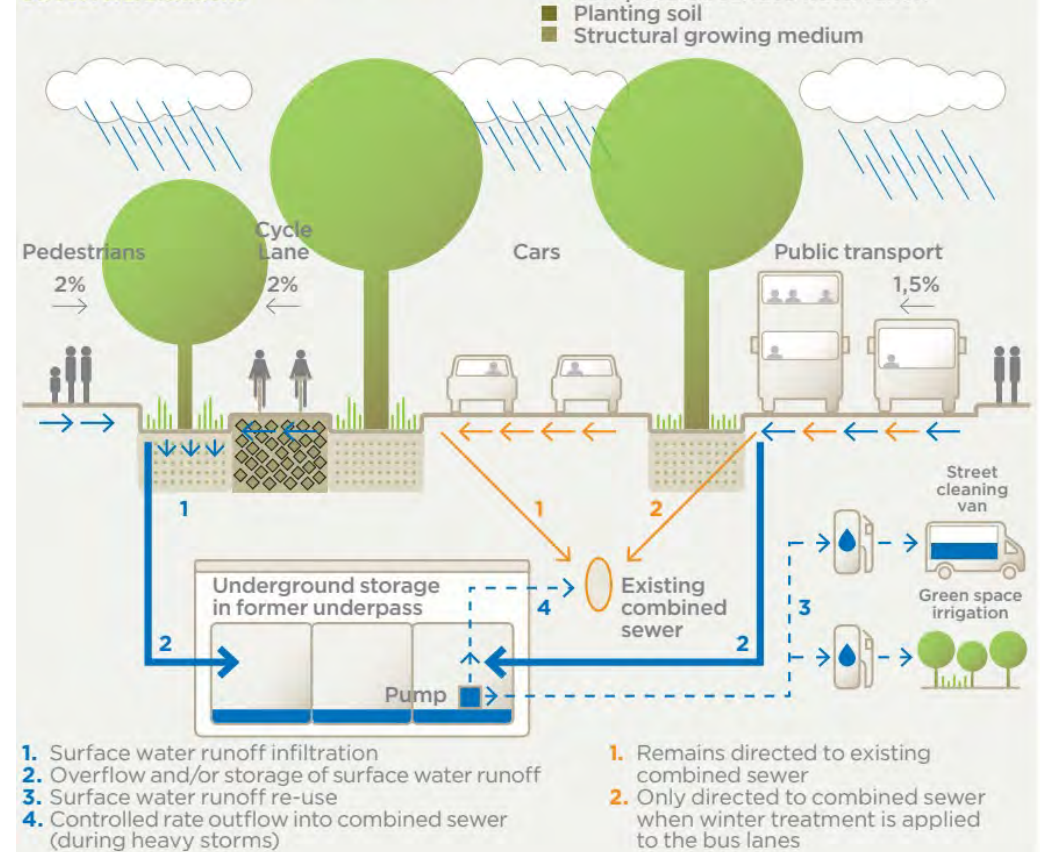
Citernes sous l'espace public

L'exemple ci-contre montre comment l'eau de pluie est récoltée dans un réservoir sous une voirie dans un ancien tunnel souterrain de circulation automobile, afin que cette eau serve au nettoyage de voirie et à l'arrosage des espaces verts. Ce genre de pratique permet d'arroser les arbres en période de sécheresse sans avoir recours au système d'eau potable, qui devient une ressource rare en période de sécheresse.

Réseau d'eau non potable

La ville de Paris est équipée d'un réseau d'eau non potable pour des raisons historiques depuis le XIX^{ème} siècle, et a l'intention d'optimiser ce réseau pour faire face à la sécheresse et lutter contre l'ICU. Selon un article de la VRT (publié le 23 juin 2020), la ville d'Anvers aurait également l'intention de se munir d'un réseau non potable en puisant dans la rivière Het Schijn (l'étude de faisabilité était en cours lors de la rédaction de l'article) pour arroser les parcs et approvisionner les fontaines, et éventuellement, à long terme, y connecter les habitations pour l'utilisation des WC.

Water management strategy for Garibaldi Street refurbishment



Exemple de schéma de récupération de pluie lors des travaux de réaménagement d'une voirie : une partie de l'eau de pluie non contaminée sera stockée dans une réserve sous la voirie (ancien tunnel de circulation automobile) pour le nettoyage des rues et l'arrosage des espaces verts (rue Garibaldi à Lyon, Trees and Design Action Group)

ARROSAGE ET ÉCONOMIE D'EAU POTABLE

Le recours aux essences résistantes à la sécheresse, l'arrosage intelligent, la collaboration avec les pompiers, la création de réservoirs dans l'espace public et la mise en place d'un réseau d'eau non potable sont autant de solutions qui permettront de faire face à la sécheresse en épargnant le plus possible le réseau d'eau potable. Il convient d'y penser dès maintenant car, d'une part, la population d'arbres et de végétation est en train de croître, et d'autre part, les épisodes de sécheresses seront de plus en plus fréquents et sévères à l'avenir.

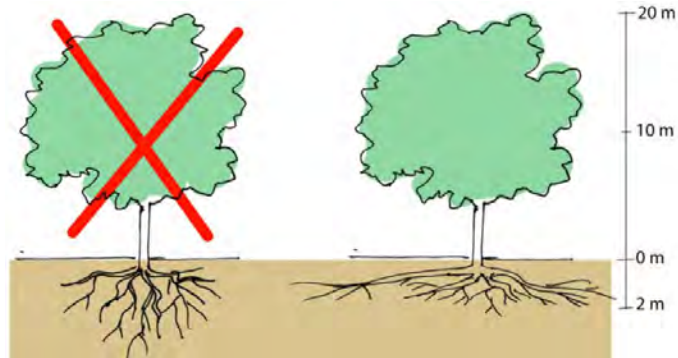
L'arrosage et les éventuels travaux visant à économiser l'eau potable doivent être budgétisés dès maintenant.

Sol et racines

Système racinaire

Le réseau des racines d'un arbre est plus étendu que profond

(Guide de plantation d'arbres en milieu urbain, Nature Québec)



Une idée répandue voulant que le système racinaire ait une forme semblable à celle-ci, ce qui n'est pas la réalité.

Un système racinaire est très étendu. Les racines sont rarement à plus de 2 mètres de profondeur et la majorité de celles-ci se retrouvent dans les premiers 60 cm.

En milieu naturel

Le système racinaire d'un arbre dans son milieu naturel est certes différent pour chaque espèce, mais on peut observer certaines tendances communes (voir également schéma en haut à droite) :

- les racines *pivotantes* à l'aplomb du houppier s'enfoncent **verticalement** à une profondeur de l'ordre de **0.90 à 2 m** ;
- les racines dites *charpentières* se développent **horizontalement** dans les premiers centimètres du sol (ceux généralement occupés par la structure de la voirie en ville) ;
- L'**emprise racinaire** de part et d'autre du tronc est au **moins égale à la hauteur de l'arbre**.

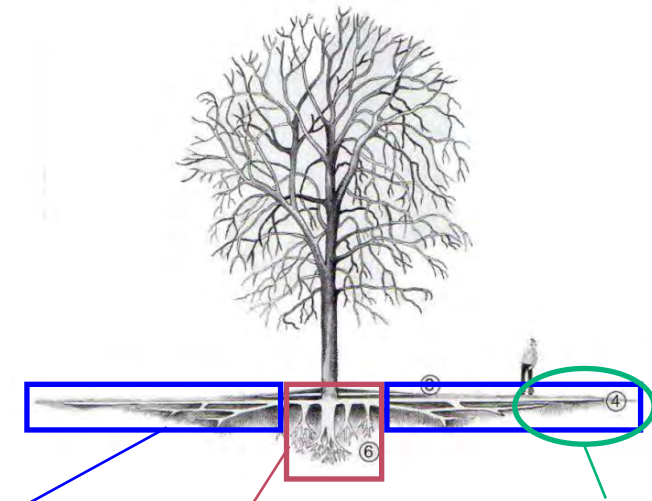
En milieu urbain

En milieu urbain, le sol disponible pour l'extension des racines est fortement réduit, ce qui explique notamment que

les arbres y sont beaucoup plus petits que s'ils étaient dans un milieu naturel et qu'ils aient une espérance de vie bien moindre. longtemps, comme le montre l'exemple en bas à droite pour les arbres d'alignement.

L'architecture racinaire s'adapte à son milieu pour survivre et peut ainsi différer fortement de la théorie. Par exemple, une fuite d'eau dans une conduite peut amener un arbre à diriger son système racinaire vers cette source d'humidité. Autre exemple : une fosse de plantation en longueur conduira l'arbre à développer ses racines suivant cette configuration.

Notons que les racines s'étendront en surface bien au-delà de la fosse (racines charpentières), sur une profondeur souvent inférieure à 60 cm. Les racines charpentières de plusieurs arbres peuvent se superposer sans pour autant se porter compétition très



Racines charpentières
vastes et superficielles

Rôle : prospection et nutrition
Largeur : 2 à 3 fois la hauteur de l'arbre
Hauteur : 20 à 60 cm

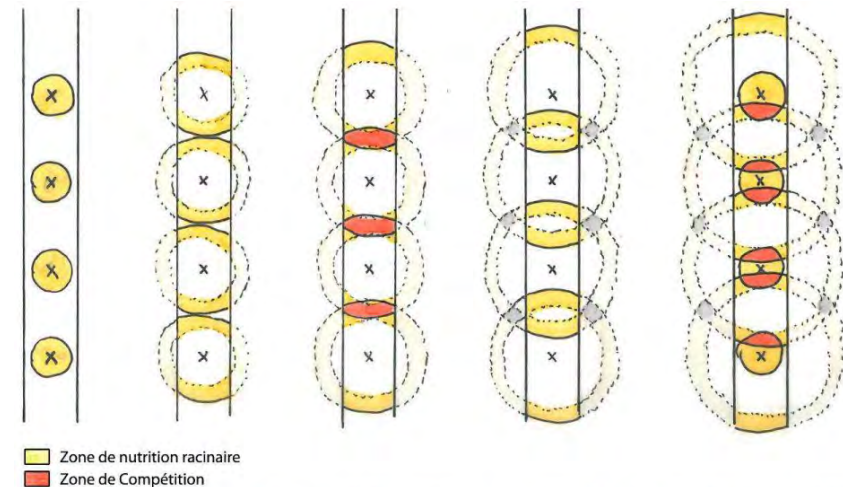
Racines pivotantes
denses et profondes

Rôle : stabiliser + survie en cas de sécheresse
Largeur : 2 à 6 m
Hauteur : 0.9 à 2 m

Zone de nutrition racinaire

80% des échanges nutritifs ont lieu à l'extrémité des racines périphériques (par des racines très fines appelées *chevelu racinaire*)

Schéma du système racinaire d'un arbre adulte, en milieu naturel
(Drénou 2006 dans Gouédard 2014)



Vue de dessus d'arbres d'alignement en ville plantés en tranchée, à différents moments de leur croissance : représentation schématique de l'emprise du système racinaire et de leur zone de nutrition (en jaune), et des zones de compétition nutritionnelle (en rouge) (Gouédard, 2014)

Taille de la fosse

La taille de la fosse dépendra de la taille de l'arbre. Il conviendra de choisir l'essence d'arbre qui sera compatible avec la taille de la fosse pour lui permettre de se développer dans les meilleures conditions possibles. Les fosses de plantation ne doivent pas systématiquement être de forme carrée, elles peuvent être de forme rectangulaire ou circulaire, mais doivent conserver un certain volume minimum.

Les chiffres renseignés ci-dessous sont à considérer comme des ordres de grandeur et seront à affiner par un spécialiste de l'arbre au cas par cas, en fonction des spécificités du milieu et de l'essence d'arbre choisie.

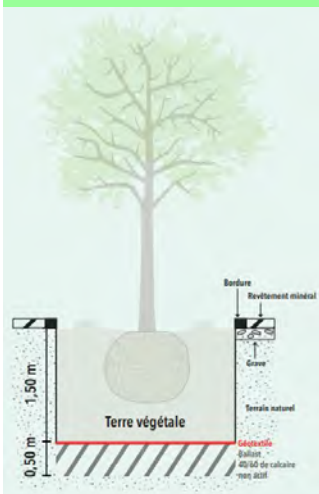
Fosse de plantation individuelle

Les fosses de plantation sont réalisées de manière individuelle pour un arbre isolé ou lorsqu'une fosse continue est impossible à réaliser (présence de réseaux, espace insuffisant...).

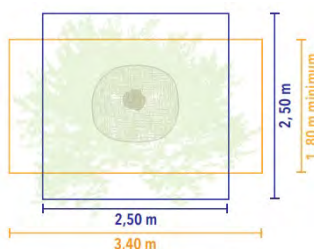
Le volume minimum est de **9 m³** pour une fosse en terre végétale et **12 m³** pour une fosse en terre-pierre (**largeur minimale : 1,80 m**). Dans certains cas exceptionnels et pour des arbres de petit développement, la fosse peut être réduite à 6 m³. La **profondeur** maximale est de **1,5 m** ; au-delà, les conditions d'oxygénation ne permettent plus le bon développement des racines. Si le drainage du sol est limitant, la profondeur de la fosse sera accrue de 50 cm pour y placer une couche de drainage. Le mélange terre-pierre est indiqué si un revêtement circulaire est prévu à proximité des arbres.

minimum de **8 m³** par arbre lorsqu'elle est comblée en terre végétale et **12 m³** lorsqu'elle est comblée d'un mélange terre-pierre. La profondeur maximale est de **1,5 m**, et la largeur minimale de la bande, **1,80 m**.

Exemple : ville de Montpellier



Coupe d'une fosse de plantation individuelle (www.montpellier.fr)



Vue du dessus d'une fosse de plantation carrée et rectangulaire offrant le même volume total de terre végétale de 9 m³ (www.montpellier.fr)



Vue du dessus d'une fosse de plantation continue (www.montpellier.fr)

La fosse doit respecter un volume

Besoin en eau et air

L'arbre a besoin **d'oxygène au niveau de ses racines** pour pouvoir survivre, en plus d'eau et de nutriments. Si les racines sont recouvertes d'un revêtement imperméable qui empêche l'échange d'oxygène avec l'atmosphère, si le drainage n'est pas suffisant et que la fosse est imbibée d'eau, ou si le sol est trop compacté, le sol peut manquer de micropores remplis d'oxygène, et cela peut provoquer sa lente asphyxie, et/ou l'endommagement des infrastructures entourant l'arbre si les racines cherchent de l'oxygène ailleurs, comme dans l'assise du revêtement de surface (soulèvement du revêtement par les racines) ou le long ou à l'intérieur des canalisations souterraines.

Éviter l'accumulation d'eau

Pour éviter que l'eau ne s'accumule dans la fosse de plantation, il est indispensable de veiller au drainage en fond de fosse.

Accès à l'eau

Dans l'espace d'enracinement, il convient :

- d'utiliser un revêtement perméable (sauf s'il s'agit d'une voirie de véhicules car les eaux de ruissellement seraient polluées) ;
- Et, sous ce revêtement, de prévoir un sol drainant et perméable (donc non compacté).

Accès à l'air

Dans un milieu naturel, le sol est composé à 50 % de constituants solides, de minéraux et de matière organique, à 30 % d'eau et à 20 % d'air. Les racines, tout comme les êtres humains, ont besoin d'oxygène, et rejettent du CO₂. Si ce CO₂ n'est pas évacué et que le sol n'est pas renouvelé en oxygène, l'arbre peut s'asphyxier.

Danger lié au compactage du sol

En milieu urbain, le sol est compacté pour assurer la portance des surfaces et résister au poids du revêtement, des piétons et véhicules. Le sol étant compacté, l'espace de « vides » laissés pour l'eau et l'air est fortement diminué.

- Il convient donc de prévoir des **zones non compactées** autour des arbres :
- une ouverture de surface de grande



Dans ce parking situé à Gelsenkirchen en Allemagne, les différents taux de croissance des arbres (tous de la même essence et plantés en même temps) ne s'expliquent que par les variations dans le volume de substrat non compacté qu'ils peuvent exploiter. (Trees and Design Action Group, Image : Johan Östberg)

- taille autour de la fosse de l'arbre ;
- des zones paysagères ou aires végétales sans revêtement à proximité, dans la zone d'enracinement (même si celles-ci ne sont pas directement contiguës à la fosse) ;
 - Privilégier les tranchées de plantation continues plutôt que des fosses isolées s'il y a plusieurs arbres ;
 - Certains dispositifs permettent d'assurer la portance de la voirie sans compacter le sol se trouvant en-dessous (voir page suivante).



Bande perméable compactée par les piétons : l'infiltration de l'eau n'est plus assurée.

Sol non compacté

Les surfaces en milieu urbain doivent permettre le passage de piétons et de véhicules. Ceci demande une certaine résistance ainsi que le compactage du sol en-dessous du revêtement. Ce compactage réduit fortement l'espace de pores et la perméabilité à l'eau, et ne répond donc pas au besoin de l'arbre et de ses racines d'avoir accès à un sol aéré et bien drainé. Certaines techniques d'ingénierie existent néanmoins pour permettre la portance des surfaces urbaines tout en laissant un sol peu compacté et aéré pour les racines.

On distingue 3 types de solutions stress hydrique)... techniques :

- les substrats structuraux
- les systèmes à caissons
- les systèmes flottants.

On peut recourir à ces solutions lors de la plantation d'un **nouvel arbre**, mais aussi pour remédier à une situation où les racines d'un **arbre existant** soulèvent le revêtement ou envahissent les conduites souterraines à la recherche d'eau et d'oxygène.

Ces solutions ont comme point commun de demander une mise en œuvre très rigoureuse nécessitant la supervision attentive du chef de chantier qui doit vérifier que les conditions de mise en œuvre sur chantier soient bien respectées.

Le but de cette section n'est pas de décrire toutes les techniques de manière exhaustive, mais de donner l'aperçu de quelques systèmes pour sensibiliser le lecteur à la nécessité de prévoir un volume de sol non compacté dans l'**espace d'enracinement** de l'arbre. Cet espace devra être délimité par les concepteurs et un spécialiste de l'arbre dès la phase de conception du projet.

Le choix d'une technique ou l'autre dépendra (entre autres) de la **portance** voulue (par exemple, une chaussée pour véhicules demandera plus de portance qu'une piste cyclable et demandera donc une solution différente), de la tolérance ou pas d'un léger **tassement** du sol, du coût...

L'**essence** de l'arbre devra être compatible avec le type de solution choisie, car les sols mis en place diffèrent par leur acidité, leur capacité de rétention d'eau (nécessité de prévoir la récupération d'eau pluviale et/ou de choisir une essence d'arbre résistante au

Systèmes flottants

Les systèmes flottants sont constitués d'un matelas placé entre le substrat d'enracinement d'une part et le revêtement de surface et ses éventuelles couches de fondation d'autre part. Le rôle de ce matelas est de répartir la charge sur l'ensemble de sa largeur, et ainsi de réduire les risques de compaction pour le substrat sous-jacent. Le matelas sert également à protéger le revêtement de surface de toute déformation liée au développement de grosses racines latérales superficielles. Il aide enfin également à l'aération du substrat d'enracinement, car il introduit une couche d'air au-dessus de celui-ci.



Installation du système d'irrigation et d'aération sur la tranchée remplie de terre végétale.



Tapis de caissons minces intégrant les tubes du système d'irrigation et aération. Image : South Tyneside Council

Substrats structuraux

Il s'agit d'excaver l'emplacement prévu pour la zone d'enracinement, et d'y placer un mélange :

- soit à base de sable (90%), matières organiques (4-5%) et argile (4.2%) : « **substrat à base de sable** », ces proportions pouvant

varier d'un système à l'autre ;

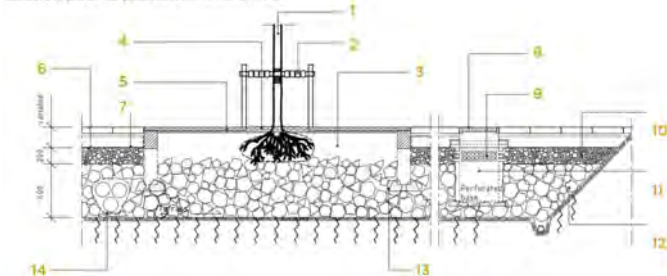
- Soit à base de pierres angulaires formant une matrice portante, et de terre dans les interstices : « **mélange terre-pierre** »

- Soit à base de pierres de gros calibre où on n'injecte de la terre que dans la partie inférieure, et la

partie supérieure est destinée à l'aération uniquement : « **système de Stockholm** ».

Le tout est compacté, mais la granulométrie du mélange est choisie de manière à laisser la place nécessaire pour l'air et l'eau malgré le compactage.

Section pour la plantation d'un arbre



1. Arbre nouvellement planté - force 20 à 25 mm
2. Lien au tuteurage
3. Terre végétale
4. Mulch minéral de 4 à 8 mm de calibre sur une épaisseur de 50 mm
5. Grille de pied d'arbre (dimensions : 1400 X 2800 mm)
6. Revêtement de surface et ses couches de fondation
7. Géotextile
8. Bouche du puits - Point bas des rigoles de collecte des eaux de pluie
9. Perforations du puits à hauteur de la couche d'aération
10. Couche d'aération
11. Puits pour l'échange gazeux et l'approvisionnement en eau de pluie
12. Mélange terre-pierre installé par couches successives
13. Faible quantité d'engrais intégré à chaque couche du mélange terre-pierre
14. Canalisations intégrées à l'installation entourées d'un géotextile et de graviers



Positionnement, sur la première couche de grosses pierres compactées, du cadre en béton supportant la grille de pied d'arbre et protégeant la motte des fondations du revêtement de surface.

Caissons

L'espace d'enracinement est excavé et des caissons auto-portants sont mis en place. L'espace est comblé de terre végétale non compactée.



Réseaux enterrés

Les arbres et leurs racines peuvent représenter une entrave pour les réseaux enterrés ; les racines peuvent bloquer leur accès pour la maintenance, voire endommager les conduits souterrains. C'est particulièrement le cas pour les réseaux d'égout : les racines y pénètrent car ces conduites sont bien ventilées et qu'elles leur procurent de l'eau. Certaines solutions évoquées ci-dessous permettent cependant d'aider à la cohabitation des arbres et des réseaux lors d'opérations d'aménagement.

Galeries multi-réseaux

La multiplication des réseaux, l'encombrement du sous-sol public, les travaux répétitifs dans les rues peuvent constituer un problème pour les responsables urbains et engendrer des nuisances pour les citoyens. La galerie multi-réseaux peut constituer une bonne solution lorsqu'elle s'avère rentable.

Le concept de **galeries multi-réseaux** consiste à regrouper dans une galerie commune et visitable (d'accessibilité contrôlée), utilisable par l'ensemble des opérateurs des services urbains en réseaux, les multiples conduites et canalisations servant à transporter les divers flux urbains (électricité, gaz, téléphone, fibre optique, eau chaude...).

Dans le contexte de la cohabitation avec l'arbre, cela permet de rationaliser l'espace souterrain occupé par ces infrastructures, d'optimiser les conditions de leur accès et entretien, tout en supprimant les risques de conflit avec les arbres.

Ce type d'ouvrage est à positionner de préférence à proximité des limites de propriété ou sous les trottoirs de manière à faciliter les raccordements latéraux.

Ces nouvelles formes d'organiser les réseaux souterrains commencent à se répandre en France et au Canada.

Pour plus d'informations

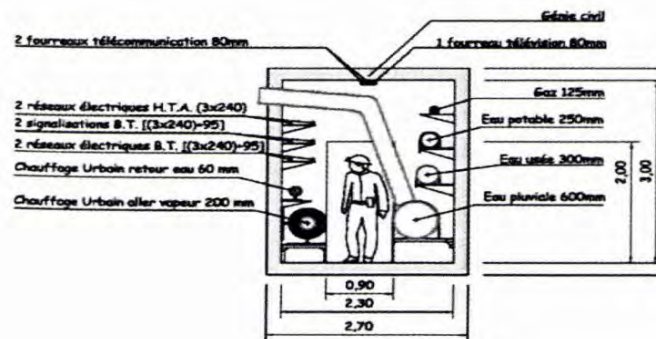
Le « Guide pratique des galeries multi-

réseaux : Clé de Sol » (2005) est le résultat de cinq ans de recherches menées sur le sujet (il aborde notamment la conception technique, la sécurité, l'exploitation, mais aussi le droit, l'analyse socio-économique et le montage juridico-financier).

Tranchées partagées

Pour les opérations de taille plus restreinte ou insérées dans le bâti existant, la réalisation d'une galerie multi-réseaux s'avère souvent trop onéreuse. Dans ce contexte, il est possible de recourir à la réalisation de **tranchées partagées** : « Le partage de

tranchée permet à la fois de réduire les perturbations occasionnées pour les piétons et les véhicules lors des chantiers tout en offrant des économies d'échelle sur les coûts de construction et de remise en état des espaces publics affectés. Le partage de tranchée aide également à mieux tirer parti de l'espace limité disponible sous la chaussée. Il convient d'envisager le partage de tranchée partout où il est susceptible d'être faisable et approprié » (Royaume-Uni, NJUG, National Joint Utilities Groups, 2013).



Galerie multi-réseaux (<https://ceriu.qc.ca/>)

Subsidence du sol

La subsidence est l'affaissement du sol provoqué par exemple par la sécheresse : le sol, en se déshumidifiant, se rétracte. Ce phénomène est surtout présent dans des sols argileux, et est accentué par la présence de racines d'arbres, surtout si ceux-ci absorbent beaucoup d'eau. Dans ce type de sol, il est approprié de recourir, quand c'est possible, à des **canalisations flexibles** pour pouvoir s'adapter aux mouvements de terrain. Une attention dans ce cas doit être portée aux endroits de raccordement entre conduit flexible et conduit rigide.

Importance du remblayage

Un des moyens de prévenir l'intrusion des racines dans les réseaux d'égouts est d'assurer lors de l'installation un remblayage compact, qui assurera la **stabilité des conduites** et évitera ainsi que celles-ci s'affaissent, puis se fissurent (les fissures constituent une porte d'entrée pour les racines).

Géotextile anti-racine

Il est possible de recourir aux géotext-

iles ou barrières anti-racine pour entourer la canalisation à protéger et le matériau de remblai.

Joints des canalisations

Une étude (Stal, 1998) a mis en évidence une force de pénétration de 15 à 20 bars/cm² exercée par les racines, alors que les joints employés pour les égouts ne sont conçus que pour résister à une pression de maximum 6 bars/cm². Le Standard du gouvernement Gallois (2012) recommande d'employer plutôt des canalisations en polyéthylène (PE) soudées (surcoût de 30%).

Espace racinaire

S'assurer que les arbres disposent d'un espace d'enracinement non compacté, bien drainé et correctement aéré dissuadera les racines d'aller chercher air et eau dans les canalisations.

Pour aller plus loin...

Une étude intitulée « **Réseaux racinaires et réseaux enterrés, quelle cohabitation possible en ville ?** » est

en cours (2021 - 2023), dont le but est d'identifier comment instaurer une cohabitation pérenne entre les réseaux racinaires des arbres et les réseaux enterrés. Les livrables et productions seront publiés en 2023 et 2024 :

- Recueil de fiches actions présentant un panorama des situations de cohabitation problématique et des bonnes pratiques pouvant être mises en œuvre pour y faire face ;

- Synthèse des connaissances scientifiques actuelles concernant le fonctionnement, l'architecture et la répartition des réseaux racinaires des arbres urbains ;

- Construction d'un nouveau sujet de recherche concernant les réseaux racinaires des arbres en milieu urbain et les outils de détection.

(<https://www.plante-et-cite.fr/projet/fiche/106>)

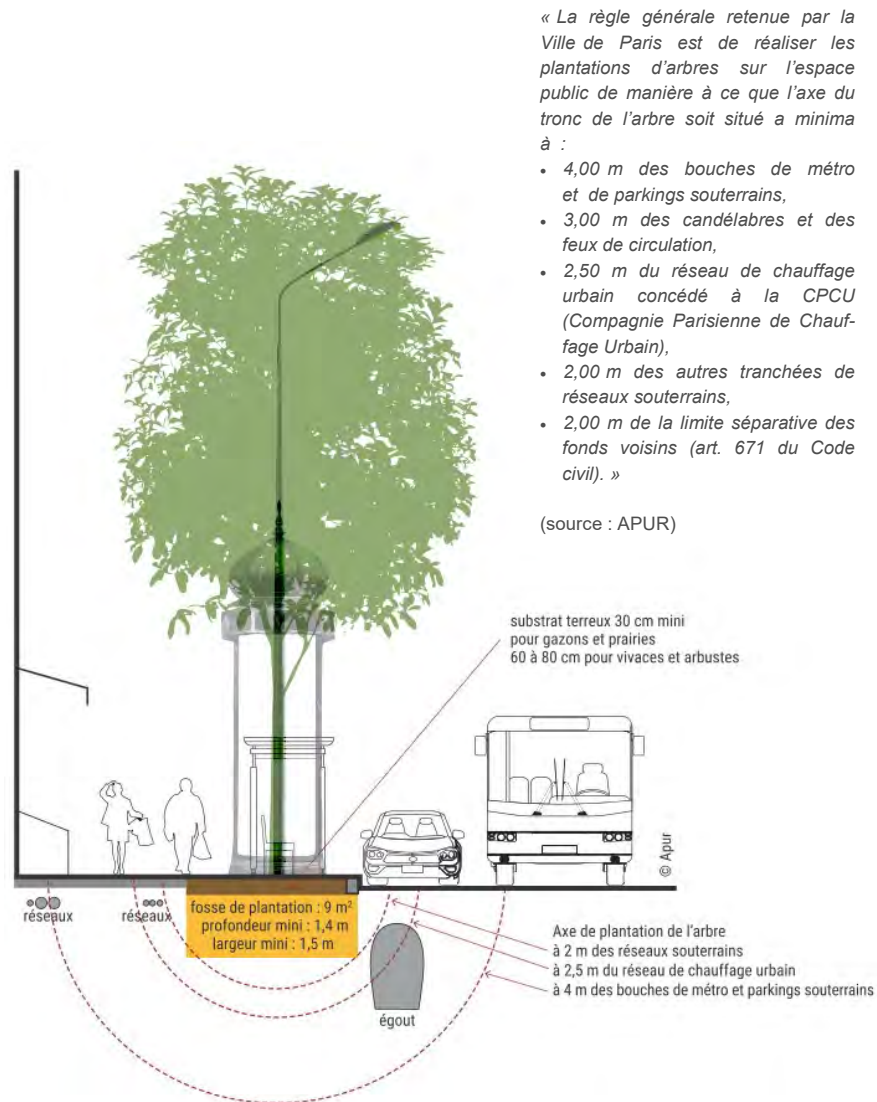


Barrière anti-racine (www.deschacht.eu)

Bruxelles Environnement a lancé une étude juridico-technique liée aux impétrants : « **Étude juridico-technique sur les impétrants en RBC : pratiques de mise en œuvre et de gestion, et leur évolution dans le cadre des plans de végétalisation relatifs aux voiries et espaces publics** » dont le projet est en cours. L'idée derrière celui-ci est d'avoir des outils pour « planter là où c'est possible » en tenant compte des impétrants, à Bruxelles.

Distances arbres - réseaux enterrés

A titre d'exemple, voici les distances à respecter pour la plantation d'arbres pour la ville de Paris. Notons que la taille de la fosse renseignée ci-dessous diffère légèrement de celle préconisée par la ville de Montpellier (page 78).



Choisir l'essence

Le choix de l'essence d'arbre dépendra du contexte urbain (type de sol, ensoleillement, ...) et du service écosystémique recherché (ombrage, fixation des polluants, abris pour la biodiversité, ...). Certaines essences d'arbres supportent un sol compact et/ou sec et d'autres pas ; les essences se différencient par l'ampleur et le besoin de leur développement racinaire, certaines sont allergisantes, certaines fixent mieux les polluants que d'autres, certaines procurent plus d'ombrage, d'autres sont plus résilientes face au changement climatique... Dès lors, comment choisir l'espèce d'arbre appropriée à un projet d'aménagement ?

Quelques outils disponibles

Le projet de recherche « **SESAME** » (<https://sesame.cerema.fr/>), développé par le Cerema, la ville de Metz et l'Eurométropole de Metz, vise à documenter un certain nombre d'espèces végétales en fonction des services écosystémiques rendus. Initialement, le projet était centré sur la capacité des arbres à dépolluer l'air, puis il s'est élargi à d'autres services écosystémiques comme la capacité d'ombrage, la régulation du climat, le support pour la biodiversité, ... ainsi que les contraintes liées à chaque espèce, comme la dimension de l'arbre, les risques sanitaires, physiques, nuisances diverses, ...

Toutes ces informations sont synthétisées en un ensemble de 85 fiches espèces, libre d'accès (<https://sesame.cerema.fr/>).

Le projet comporte une seconde phase censée se clôturer à l'heure où nous écrivons ces lignes, et sera élargie à l'étude de 250 espèces, et les services écosystémiques rendus par les végétaux seront étendus. Un outil informatique proposera les essences conseillées selon les contraintes du site (sol compact, peu aéré, ensoleillement, ...) et les effets voulus (régulation du climat, dépollution de l'air, ...).

Un second outil, développé par la région Hauts-de-France et l'ADEME

(<https://data.ademe.fr/>), **ARBOClimat** vise à faciliter la mise en place d'arbres présentant un maximum d'atouts au regard du climat actuel et futur. Il s'adresse notamment aux gestionnaires de patrimoine arboré ou aux services des espaces verts, aux techniciens en charge des plans climat -air-énergie territoriaux ou aux élus chargés de l'aménagement ou de l'environnement. Disponible en open data, ARBOClimat permet de réaliser des simulations prospectives de plantation d'arbres en ville et d'en évaluer les impacts selon divers indicateurs comme par exemple la capacité à stocker le carbone, l'intérêt pour la biodiversité, l'impact sur la qualité de l'air ou le potentiel allergisant.

Mixité d'essences

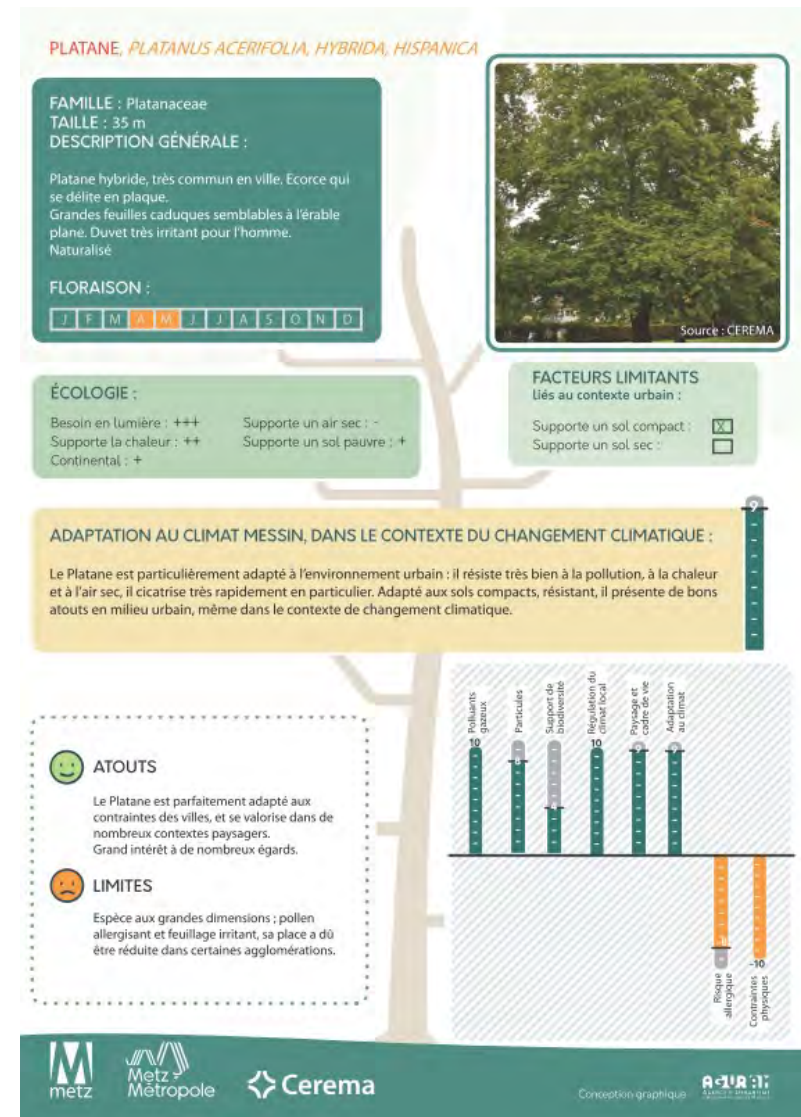
Même s'il est communément admis d'un point de vue paysager de recourir à une essence par tronçon de voirie, la mixité des espèces, pratique peu répandue, présente de nombreux avantages :

- Favoriser la biodiversité ;
- Limiter le risque de propagation des maladies et parasites ;
- Limiter les répercussions d'événements extrêmes (inondations, salage, pollution superficielle, ...) car toutes les espèces n'ont pas la même sensibilité à ces phénomènes ;
- Limiter la concentration de pollen allergisant ;
- Favoriser l'équilibre physico-

chimique des sols

- Augmenter la résilience de la population d'arbres (idéalement, aucune espèce ne devrait représenter plus de 10% de l'ensemble) ;
- Par la diversité des gabarits, favoriser la pénétration du vent au fond de canyon urbain et permettre ainsi le mélange entre l'air de la voirie, pollué, et l'atmosphère.

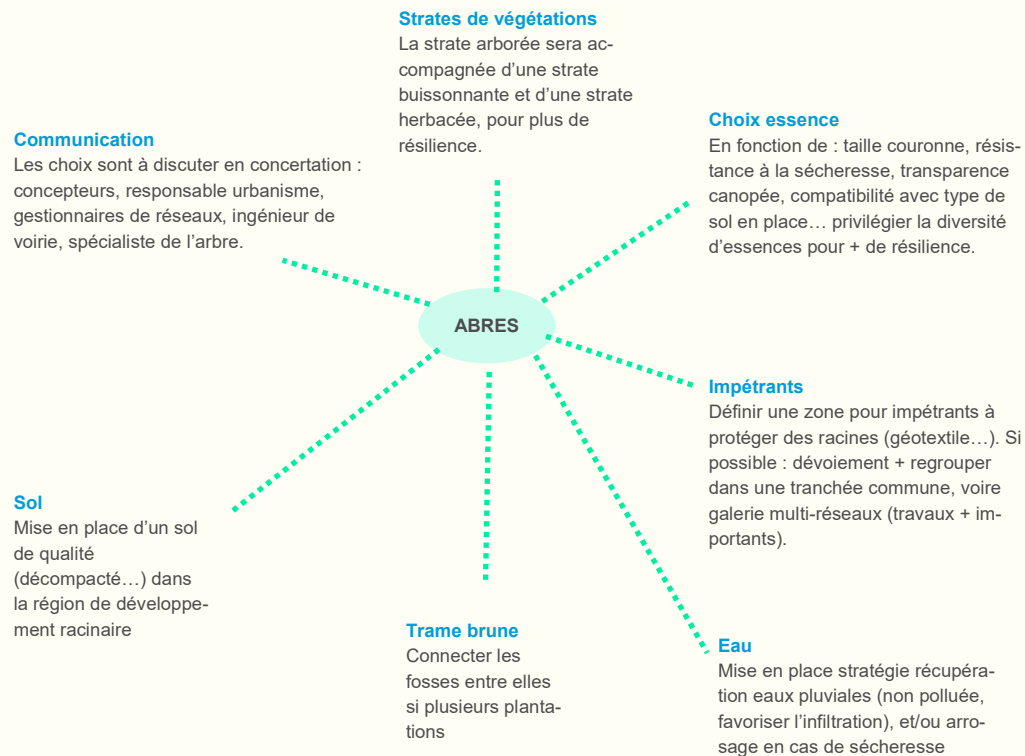
De même, dans l'espace public, il peut être intéressant de recourir à des essences différentes en fonction, par exemple, de la possibilité ou non de recourir à l'infiltration des eaux pluviales : un endroit situé en dépression et récoltant les eaux pluviales pourra accueillir un arbre ayant un besoin en eau plus important et ayant par conséquent un meilleur pouvoir rafraîchissant, et un peu plus loin, là où la récupération en eaux pluviales n'est pas possible, prévoir une essence résistante à la sécheresse.



Exemple de « fiche essence » pour le platane (outil SESAME : <https://sesame.cerema.fr/>)

Planter un arbre

Éléments à prendre en compte pour planter un arbre en milieu urbain (synthèse)



4

Matériaux urbains

Le type de matériau employé dans l'espace public a un impact direct sur la température des surfaces. Les surfaces minérales, à l'inverse des surfaces végétales, sont capables de stocker de grandes quantités d'énergie lorsqu'elles sont ensoleillées. Cette énergie sera restituée à l'environnement la nuit et participera à l'accentuation de l'ICU (confort nocturne). Ce chapitre aborde les caractéristiques des matériaux qui ont un impact sur le confort thermique diurne et nocturne, en distinguant leur effet s'ils sont placés dans une zone fortement ensoleillée ou fortement ombragée.

Albédo

L'albédo est la proportion de rayonnement solaire qui est réfléchi par une surface. Une valeur de 0 correspond à une absence de réflexion (corps noir) et une valeur de 1 à une réflexion totale (teinte de matériau claire). Les matériaux de couleur foncée dont l'albédo est proche de 0 s'échauffent donc très fort lorsqu'ils sont ensoleillés.

Utiliser des matériaux clairs, à albédo élevé, est souvent cité comme une mesure pour lutter contre l'ICU. S'il est vrai que ce type de matériau s'échauffe moins qu'un matériau sombre, il réfléchit également plus de rayons solaires en journée et peut ainsi être source d'éblouissement. De plus, le confort thermique ressenti la journée n'est pas fortement amélioré par un revêtement de sol clair, car le gain en température de surface est compensé par l'augmentation de la réflexion qui peut générer un inconfort thermique. La réflexion du rayonnement solaire peut en outre provoquer des *échaudures* (coup de soleil) sur les troncs d'arbres. Il ne faut donc pas faire de l'albédo un critère de choix, mais juste privilégier un juste milieu, et opter pour un matériau ni trop foncé, ni trop clair.

Notons que la rugosité de la surface influence également l'albédo : une surface rugueuse présentera un albédo plus faible qu'une surface lisse.

Matériau	Couleur	Utilisation	Albédo retenu
Dalles, pavés	Gris clair - beige	Espaces publics	0,45
Bois	Marron-gris clair	Espaces publics	0,35
Gazon	Vert	Surfaces naturelles	0,3
Béton	Gris	Espaces publics	0,25
Sol nu, terre	Brun	Surfaces naturelles	0,2
Béton bitumineux	Gris-noir	Espaces publics	0,15
Sable	Brun clair	Espaces publics	0,15
Asphalte	Noir	Espaces publics	0,05
Enduits superficiels	Noir	Espaces publics	0,05

Valeurs d'albédo (A'URBA)

ALBEDO élevée(matériau clair)		
	CONFORT THERMIQUE LE JOUR	CONFORT THERMIQUE LA NUIT (ICU)
ZONE OMBRAGEE	L'albédo n'a pas d'effet.	L'albédo n'a pas d'effet.
ZONE ENSOLEILLEE	+ - Albédo élevé (couleur claire) : température de surface moins élevée, mais rayonnement plus élevé (l'un compense l'autre). Risque d'éblouissement.	+ Albédo élevé (couleur claire) : le matériau s'étant moins échauffé le jour, il est moins chaud la nuit aussi.



Stabilité renforcée beige doré (A'URBA)



Asphalte clair (A'URBA)



Béton hydraulique gris clair (A'URBA)



Granit gris foncé (A'URBA)



Asphalte gris foncé (A'URBA)



Béton bitumineux noir (A'URBA)

Albédo élevé
Matériau clair et lisse
Réfléchit les rayons solaires
Température de surface peu élevée (mais éblouissement et réflexion solaire)
Lutte contre ICU

Albédo faible
Matériau foncé et rugueux
Absorbe les rayons solaires
Temp de surface élevée
Aggrave l'ICU

Capacité thermique

La capacité thermique (ou calorifique) est la capacité d'un matériau à emmagasiner de la chaleur, à l'instar d'un réservoir. Un matériau à forte capacité thermique stocke le rayonnement solaire reçu la journée pour le restituer la nuit. L'évolution de sa température est lente : il met longtemps à s'échauffer le jour, et se refroidit lentement la nuit. C'est un matériau qui restera chaud la nuit de longues heures et participera à l'accentuation de l'ICU.

Les matériaux lourds sont des **réservoirs de chaleur**, ils ont une grande capacité thermique (J/m³K). Ils se réchauffent et se refroidissent très lentement. La nuit, ils restent chauds de longues heures et réémettent petit à petit la chaleur emmagasinée la journée. Ensuite, la journée, ils s'échauffent lentement, préservant la fraîcheur nocturne, surtout s'ils restent à l'ombre. Leur lenteur de réaction crée en décalage temporel nommé *déphasage thermique*.

Les matériaux légers, eux, n'accumulent pas de chaleur. Ils s'échauffent et se refroidissent fort et rapidement. Le bois et les matériaux isolants sont légers.

La capacité thermique est ainsi fortement corrélée au caractère isolant d'un matériau (conductivité thermique « lambda » en W/mK), ainsi qu'à sa masse volumique (kg/m³), comme l'indique le tableau ci-contre.

La capacité thermique est rarement renseignée dans la documentation technique des matériaux, par contre la densité (kg/m³) est plus facilement accessible et permet de comparer les matériaux entre eux.

		Isolation	Matériau lourd/ léger	Accumulation de chaleur	
				Cond. th. λ (W/mK)	Capacité therm. c (MJ/m³K)
			Masse vol. ρ (kg/m³)		
Pierres (granit, ...)	lourdes	3.5	2700 à 3000		2.7 à 3
Pierre bleue, pierre calcaire		2.9 à 3.5	2700		2.7
Marbre		2.9 à 3.5	2800		2.8
Béton armé		1.7 à 2.2	2400		2.4
Asphalte coulé		0.7	2100		2.1
Sable sec, gravier		0.3 à 0.4	1600 à 1800		1.4 à 1.6
Terre (sèche - humide)		0.75 - 2	1250		1.35
Briques terre cuite		0.22 à 0.8	700 à 2100		0.7 à 2.1
Bois		0.13 à 0.20	600		1.1
Isolant		0.02...0.06	50 à 150		0.1

Valeurs de conductivité thermique (Lambda), masse volumique (ρ) et capacité thermique (c) de certains matériaux de construction

CAPACITE THERMIQUE élevée (matériau lourd)		
	CONFORT THERMIQUE LE JOUR	CONFORT THERMIQUE LA NUIT (ICU)
ZONE OMBRAGEE	+ Un matériau lourd garde la fraîcheur de la nuit	S'il n'a pas été soumis à l'ensoleillement en journée, le matériau lourd n'a pas accumulé beaucoup d'énergie et ne participera presque
ZONE ENSOLEILLEE	La capacité thermique du matériau n'a que très peu d'influence sur le confort thermique dans une zone ensoleillée.	- La chaleur emmagasinée la journée sera lentement restituée la nuit, le matériau lourd gardera



Béton



Briques



Gravier



Terre



Bois



Isolant

Matériau lourd (kg/m³)
Capacité thermique élevée
Temp. évolue lentement
Accumule la chaleur le jour
et la restitue la nuit (aggrave l'ICU)

Matériau léger (kg/m³)
Capacité thermique faible
Temp. évolue rapidement
N'accumule presque pas de chaleur
Matériau isolant



Effusivité

L'effusivité caractérise la sensation de chaud ou de froid que donne un matériau lorsqu'on le touche. On peut jouer sur cette propriété physique dans le choix du mobilier urbain et les revêtements de façade et de voirie pour accroître le confort thermique.

Si on pose la main sur du bois et de l'acier de même température (disons 20°C), l'acier paraît plus froid, et le bois paraît plus chaud. La sensation de "chaud" ou de "froid" provient non pas de la température de l'objet que l'on touche, mais du flux thermique entre la peau et cet objet. Or, un matériau de faible effusivité (bois, textile...) prend très rapidement la température de la peau quand on le touche et donnera une sensation de « chaud », et un matériau de grande émissivité (acier, marbre, pierre, ...) donnera une sensation de « froid ».

Ce phénomène est également observable lorsque l'on marche pieds nus : le marbre est ressenti comme un matériau froid, alors qu'il est à la même température que l'air ambiant.

L'effusivité E est égale à $\sqrt{\lambda \cdot c}$ (1^{ère} et 3^{ème} colonnes du tableau de la page précédente) et est donc fortement corrélée à la masse volumique d'un matériau (c'est-à-dire, s'il est lourd ou

léger). Un matériau « lourd » donne une sensation de froid, et un matériau léger, une sensation de « chaud ».

Attention, le métal (matériau très lourd), qui donne une sensation de froid s'il est à 20°C, peut brûler s'il a une température plus élevée que celle de la peau (grille du four, ...).

Dans le contexte de l'aménagement urbain et du confort thermique extérieur, nous pouvons comprendre qu'un matériau fortement effusif (marbre, pierre, granit, ...) procurera une sensation de fraîcheur s'il se trouve à l'ombre (et que sa température, par conséquent, est moins élevée que celle du corps humain), ou au contraire une sensation de chaleur si ce matériau s'est fortement réchauffé sous l'effet du rayonnement solaire.

On peut donc utiliser cet propriété thermique dans le choix des revêtements et du mobilier urbain, en fonction de leur ensoleillement.

	Sensation chaud / froid
	Effusivité E (J/m²K\s)
Cuivre	37 000
Aluminium	23 700
Fer	15 800
Fonte	12 000 à 16 000
Acier inoxydable	7 100 à 11 000
Pierre lourde (granit, ...)	3000 à 3200
Pierre bleue, pierre calcaire	2800 à 3200
Marbre	2800 à 3100
Béton	2000 à 2300
Eau	1 590
Asphalte coulée	1200
Sable sec, graviers	650 à 800
Terre sèche / humide	1000 à 1600
Briques de terre cuite	400 à 1300
Peau humaine	400
Bois	350 à 450
Isolant	50 à 80

Valeurs d'émissivité pour certains matériaux

Métaux
Très grande émissivité
À proscrire dans une zone ensoleillée, danger de brûlure

Matériaux lourds
Sensation de frais à l'ombre (+)
Sensation de chaud au soleil (-)

Matériaux légers (bois)
Pas de sensation de « froid » ni « chaud ».
Approprié pour endroit ensoleillé (pas de brûlure, pas de sensation de « chaud »).



Revêtement de façade en cuivre à proscrire si la façade est ensoleillée (danger de brûlure). (photo : © Eckhart Matthaeus / www.em-foto.de)



Le mobilier urbain en matériaux lourds, fort émissifs, peuvent apporter une sensation de fraîcheur s'il n'a pas été ensoleillé



Au soleil, privilégier du mobilier urbain en bois, peu effusif, donc sans sensation de chaleur ni danger de brûlure. Dans les structures de jeux, attention au toboggan en métal qui peut être très chaud.

EFFUSIVITE élevée (matériau lourd)		
	CONFORT THERMIQUE LE JOUR	CONFORT THERMIQUE LA NUIT (ICU)
ZONE OMBRAGEE	+ Un matériau émissif donnera une sensation de fraîcheur (pierre, marbre, béton, ...)	S'il n'a pas été soumis à l'ensoleillement en journée, le matériau lourd n'a pas accumulé beaucoup d'énergie et ne participera presque
ZONE ENSOLEILLEE	Un matériau émissif donnera une sensation de chaleur si ta température est plus élevée que celle du corps humain (soir), et de fraîcheur si sa température est moins élevée (matin). Proscrire les métaux.	- La chaleur emmagasinée la journée sera lentement restituée la nuit, le matériau lourd gardera une température élevée de longues heures.

Albédo, capacité thermique, effusivité

Tableau comparatif

Le tableau ci-dessous reprend les valeurs d'albédo, capacité thermique et effusivité de matériaux utilisés dans l'espace urbain.

	Albédo	Isolation	Matériau lourd/ léger	Accumulation de chaleur	Sensation chaud / froid
		<i>Cond. th. λ (W/mK)</i>	<i>Masse vol. ρ (kg/m³)</i>	<i>Capacité therm. c (MJ/m³K)</i>	<i>Effusivité E (J/m²K√s)</i>
Métaux	N/A	17 à 380	2700 à 10 000	2,4 à 3,6	7100 à 37 000
Pierres lourdes (granit, ...)	Gris clair, beige: 0,45	3,5	2700 à 3000	2,7 à 3	3000 à 3200
Pierre bleue, pierre	Gris clair,	2,9 à 3,5	2700	2,7	2800 à 3200
Marbre	Gris clair, beige: 0,45	2,9 à 3,5	2800	2,8	2800 à 3100
Béton	0,25	1,7 à 2,2	2400	2,4	2000 à 2300
Asphalte coulé	0,05	0,7	2100	2,1	1200
Sable sec, gravier	0,15	0,3 à 0,4	1600 à 1800	1,4 à 1,6	650 à 800
Terre (sèche - hu- mide)	0,2	0,75 - 2	1250	1,35	1000 à 1600
Briques terre cuite	0,2 à 0,4	0,22 à 0,8	700 à 2100	0,7 à 2,1	400 à 1300
Bois	0,35	0,13 à 0,20	600	1,1	350 à 450
Isolant	N/A	0,02...0,06	50 à 150	0,1	50 à 80

Perméabilité et végétation

Dans le cas d'un sol perméable ou d'un sol végétalisé, le phénomène permettant de rafraîchir l'air et accroître le confort thermique de l'utilisateur passe par le phénomène d'évapotranspiration. Pour les zones végétales, on parle d'évapotranspiration.

Si un sol est perméable, l'eau contenue dans le sous-sol peut s'évaporer et rafraîchir l'air ambiant, ainsi que la surface du matériau de voirie. Cet effet prend place lorsque le sol est humide, et peut être très prononcé et fortement apprécié juste après une averse.

Pour un sol végétal, la capacité d'évapotranspiration dépendra également de l'eau présente dans le sol, d'où

l'importance d'une gestion efficace des eaux pluviales, et éventuellement d'un arrosage en période de sécheresse.

Les info-fiches de Bruxelles Environnement (<https://environnement.brussels/>) sur la gestion de l'eau pluviale regorgent d'informations très complètes et ne seront pas reprises ici. En complément, Plantes et Cité (<https://www.plante-et-cite.fr>) propose un

guide sur les revêtements perméables classés par fiche (image ci-dessous).

TyPOLOGIE DES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

NON LIÉS



MODULAIRES



LIÉS



	1 Mélanges organo-minéraux et couverts enherbés				
	USAGES				
	ENTRETIEN				
	2 Revêtements meubles organiques				
	USAGES				
	ENTRETIEN				
	3 Revêtements meubles minéraux				
	USAGES				
	ENTRETIEN				
	4 Pavés drainants ou à joints poreux				
	USAGES				
	ENTRETIEN				
	5 Dalles alvéolées				
	USAGES				
	ENTRETIEN				

	6 Platelages bois				
	USAGES				
	ENTRETIEN				
	7 Bétons de résines drainants				
	USAGES				
	ENTRETIEN				
	8 Bétons drainants				
	USAGES				
	ENTRETIEN				
	9 Enrobés poreux				
	USAGES				
	ENTRETIEN				

LEGENDE

USAGES

Parking

Voie pour véhicules légers

Voie pour véhicules lourds

Support de plantation

Accompagnement de plantation

Aménité paysagère

Accessible

Accessibilité avec dispositif

Non accessible

ENTRETIEN

Tonte

Désherbage

Semis

Garnissage / rebouchage

Ratissage / balayage

Pression / aspiration

Végétalisable

Non végétalisable

CARACTÉRISTIQUES ET MISE EN ŒUVRE

Coût de mise en œuvre

Fondation de faible épaisseur

Fondation de forte épaisseur

Perméabilité



Voie d'accès pompier pas dalles alvéolées remplies de gazon (Plantes et Cité)



Dalles engazonnées, parking (© Pierre Héry, Orléans)



Mélange terre-pierre pour zone de stationnement (© P&C - Andréa Loreau, Plantes et Cité)



Pavés drainants à joints élargis (© Adopta - Maëlle Ancelle, Plantes et Cité)



Utilisation d'un béton de résine dans une cours d'école (© Anthély - Meudon)



Béton drainant pour voie piétonne (© Wendy Arnould - Saint Pierre)



Exemple de pavés à ouverture de drainage - Villeurbanne, Parc Édouard Glissant (© VAL'HOR)



Exemple de pavés à joints engazonnés - Nantes (©P&C - Sandrine Larramendy)



Cours d'école oasis avec revêtement en béton drainant coloré (©Thiollier, Cours Oasis - Ville de Paris)



Enrobé poreux utilisé en voirie à Douais (© Hérin - Adopta)



Enrobé poreux sur structure réservoir (© Lille Métropole)

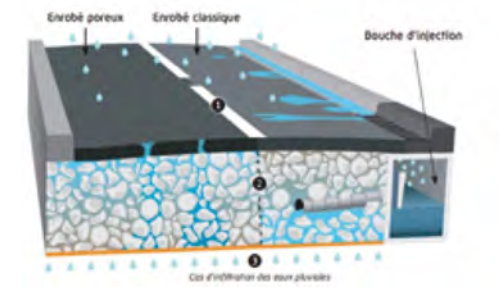


Schéma d'une chaussée à structure réservoir (Adopta)



Pavés poreux (CIM Béton)



Pavés à joints larges (CIM Béton)



Série de 4 photos de revêtements drainants en béton illustrant différentes applications : abords de piscine, place, parking et trottoir (CIM Béton)



Le tram de Montpellier présente de nombreuses portions de voies engazonnées (<http://www.biodiversite-positive.fr> © JL Zimmermann)



Aire de jeu avec revêtement en copeaux de bois (© P&C - Robin Dagois)



Pavés à joints larges engazonnés avec noue paysagère (CIM Béton)

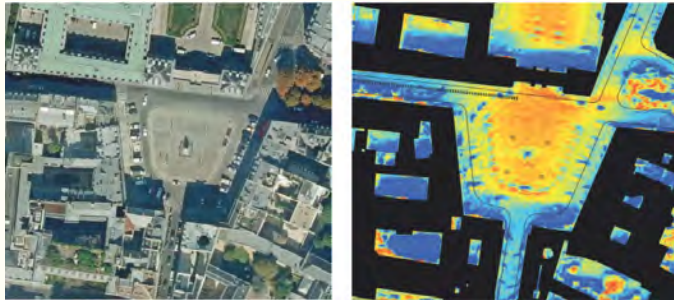


Exemple de platelage pour places de stationnement (© Wendy Arnould)



Passage en béton préfabriqué drainant avec brumisateurs (CIM Béton)

Quel matériau choisir ?



Exemple d'étude d'ensoleillement : orthophoto (à gauche, © InterAtlas 2012) et enssoleillement cumulé durant 24h le 19 août (à droite, © APUR)

Diagnostic en amont pour matériaux perméables

- **Possibilité d'infiltration?** si construction sur dalle, parking souterrain, station de métro, présence de polluants, hauteur de nappe élevée,... : **l'infiltration n'est pas possible**. Dans ce cas, déporter l'eau vers un **réservoir** souterrain, par exemple.

Etude d'ensoleillement

- Le logiciel BIM Solar (<https://www.bim-solar.com/fr/bimsolar/>) est un logiciel gratuit et facile d'utilisation. Il peut générer des cartes solaires comme l'image ci-dessus à partir de la géométrie des bâtiments de la base de donnée URBIS.

Voir également
p.174 à 177

ETUDE D'ENSOLEILLEMENT

Enssoleillement cumulé sur 24h un jour d'été (exemple ci-contre)
Identifier la position des piétons et cyclistes ; les mesures d'atténuation de l'ICU se focaliseront sur ces endroits.

ZONES ENSOLEILLEES

Confort diurne

Le choix des matériaux dans les zones enssoleillées a **très peu d'influence sur le confort de l'utilisateur**. Un albédo élevé (surface claire) s'échauffera moins, mais cet effet sera compensé par l'augmentation du rayonnement solaire réfléchi, sans compter l'éblouissement que le matériau procure.

Les **matériaux, qu'ils soient lourds ou légers**, commenceront à s'échauffer dès qu'ils seront enssoleillés, et atteindront des températures élevées en fin de journée. Les matériaux **légers** (bois, ...), grâce à leur faible effusivité, ne brûleront pas, au contraire des matériaux lourds et des métaux qui pourraient aller jusqu'à occasionner des brûlures. Les matériaux légers pourraient dès lors constituer une solution pour réduire l'inconfort thermique, sans toutefois arriver à procurer une ambiance thermique confortable.

Un **mobilier urbain** en matériau léger (bois) est à privilégier pour ne pas brûler l'utilisateur. Les matériaux lourds, eux, seraient peut-être utilisés par les usagers le matin, mais seraient progressivement abandonnés au cours de la journée, au fur et à mesure que leur température augmenterait.

Confort nocturne (ICU)

Les matériaux à **albédo élevé** (surfaces claires) seront moins chauds à la tombée du soir, et participent donc moins à l'ICU. Cependant, tous les matériaux à grande capacité thermique (c'est-à-dire la quasi-totalité des matériaux urbains, seul le bois fait exception) aura emmagasiné une grande quantité d'énergie qu'ils restitueront lentement au cours de la nuit.

ZONES OMBRAGEES

Confort diurne

Les zones ombragées seront très peu soumises au rayonnement solaire ; il y fera bon, en particulier le matin. Les matériaux s'échaufferont peu, quelle que soit leur **albédo**.

Les **matériaux lourds** auront gardé la fraîcheur de la nuit grâce à leur capacité thermique élevée. Ils seront agréablement frais le matin, puis s'échaufferont lentement et peu au cours de la journée, sans devenir brûlants.

Un **mobilier urbain** en matériau **lourd** permettra de se reposer tout en bénéficiant de la fraîcheur qu'ils procurent au toucher (banc en granit, ...). Les zones ombragées sont propices à l'aménagement d'**îlots de fraîcheur**.

Confort nocturne (ICU)

Les matériaux s'étant peu échauffés en journée, ces zones resteront peu soumises à la surchauffe urbaine.

MATERIAUX PERMEABLES ET VEGETAUX

Les matériaux perméables et les surfaces végétales permettent de produire un effet d'évaporation de l'eau contenue dans le sol et sont à privilégier dans les revêtements de voirie, que celle-ci se situe à l'ombre ou au soleil. Ils procureront une **sensation de fraîcheur et réduiront le stress thermique de jour et l'ICU la nuit**. L'infiltration d'eau est à mettre dans le contexte général de la gestion durable des eaux pluviales sur la parcelle.

MATERIAUX CONSEILLES

- **PRIVILEGIER MATERIAUX PERMEABLES, VEGETAUX**
- **PRIVILEGIER MATERIAUX LEGRS (BOIS)** lorsque cela est possible (y compris pour mobilier urbain). Proscrire les métaux.
- **ALBEDO ELEVE** : faible impact positif la nuit

MATERIAUX CONSEILLES

- **PRIVILEGIER MATERIAUX PERMEABLES, VEGETAUX**
- **PRIVILEGIER MATERIAUX LOURDS** (y compris pour mobilier urbain)
- **ALBEDO** : sans effet

5

Morphologie urbaine

La morphologie urbaine a un impact déterminant sur l'ICU. Elle favorisera ou défavorisera la ventilation naturelle, et accentuera l'ICU par l'effet canyon.

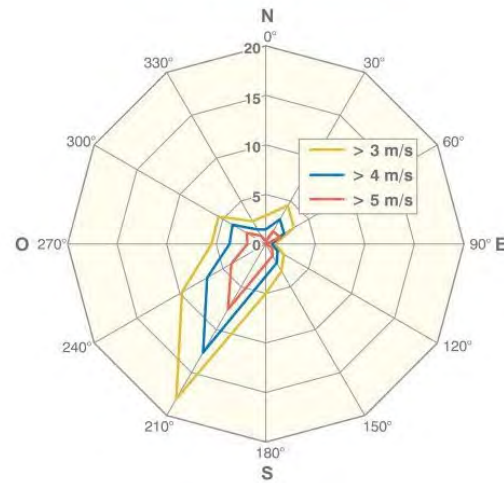
Morphologie et vent

Le vent en ville

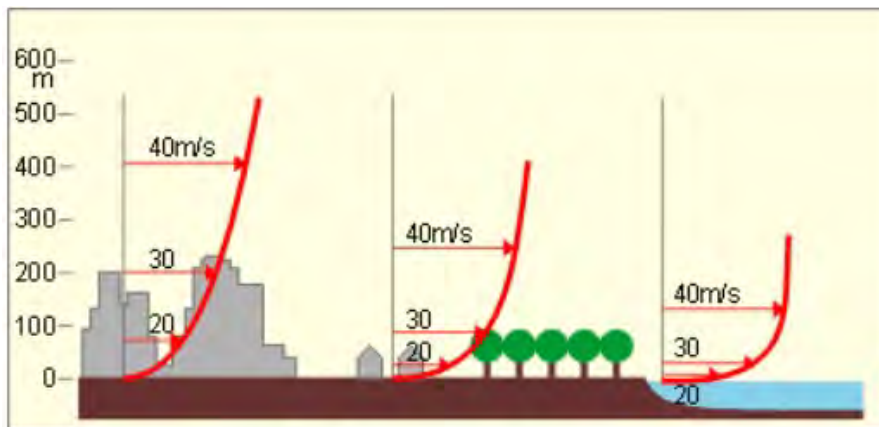
Le vent est créé par le déplacement de masses d'air dû à une différence de température et de pression atmosphérique. Le vent dans le milieu urbain est ralenti par les obstacles que représentent les bâtiments. L'écoulement de l'air dans les rues dépend du vent au-dessus de la *canopée* de bâtiments, ainsi que de la géométrie des rues, des bâtiments, des intérieurs d'îlot, de l'espaces publics, ... Cet écoulement est très complexe, et variable au cours d'une journée, ou même d'une heure.

Rose des vents en Belgique

Le régime des vents moyens est représenté par une rose des vents, qui exprime la distribution statistique des vents suivant leur direction. En Belgique, les vents dominants proviennent du S-SO.



Rose des vents en Belgique
(<https://www.guidebatimentdurable.brussels>)



Impact du tissu urbain sur le ralentissement du vent (<https://energieplus-lesite.be>)

Exemple d'une rue canyon

Le vent dominant est ici dirigé perpendiculairement à la rue, occasionnant un mouvement d'air en spirale vers le fond du canyon urbain. Ceci qui explique pourquoi, dans ce cas, la direction du vent au niveau du sol est opposée au vent dominant. L'écoulement du vent au sein d'une ville est extrêmement complexe et variable.

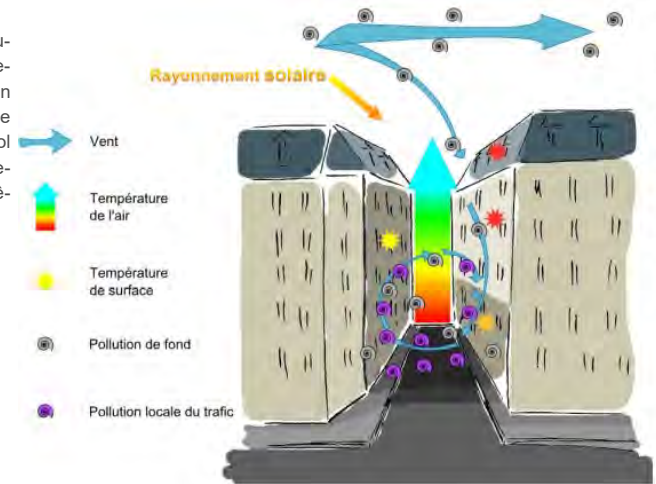


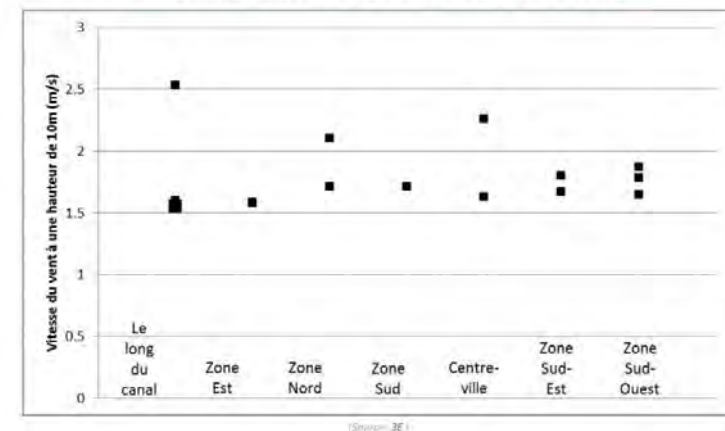
Schéma d'une rue canyon (IAU)

Mesures à Bruxelles

La vitesse du vent dans les villes est aujourd'hui très mal connue et elle dépend fortement de la configuration du bâti. Il est fort possible qu'un bâtiment situé dans le centre de Bruxelles ne reçoive pas de vents dominants sud-sud-ouest à cause de l'ensemble des obstacles créés par la ville. Une étude par simulation aérodynamique du contexte

urbain sera souvent nécessaire pour avoir une meilleure idée des vents à l'échelle du bâtiment. Plusieurs méthodes simples et détaillées existent dans la littérature pour déterminer l'effet de la localisation du bâtiment sur la vitesse du vent. Cependant, pour les sites urbains ces méthodes sont toujours approximatives. L'on préférera utiliser les résultats des calculs de

détermination des vitesses moyennes annuelles de vent menés dans le cadre d'une évaluation du potentiel éolien urbain dans la région de Bruxelles-Capitale. Ces résultats indiquent la vitesse du vent à une hauteur de 10m pour plusieurs points de mesures sur diverses zones géographique de Bruxelles.



Vitesse du vent calculée à une hauteur de 10 m en Région de Bruxelles-Capitale en 2012 (3E dans <https://www.guidebatimentdurable.brussels>)

Brises thermiques

Lorsque le ciel est dégagé et qu'il n'y a pas de vent au niveau régional (situation météorologique dite *radiative*), des brises thermiques peuvent se développer. Elles sont créées par des différences de température entre masses d'air, et l'air froid, plus lourd, coule le long des pentes, alors que l'air chaud s'élève. Les rues en pente ont tendance à canaliser et accentuer ces brises thermiques, alors que les rues perpendiculaires à la pente ont tendance à les freiner. Les brises thermiques ont plus de chance de survenir la nuit, en l'absence de rayonnement solaire. Elles permettent **d'améliorer le confort thermique et dispersent les polluants**.

Confort thermique

Ces brises ne sont, à notre connaissance, pas mesurées sur le territoire de Bruxelles, à l'exception de la campagne de mesures réalisées dans le cadre de cette étude, montrant des vitesses d'air nocturnes très variables en fonction du site et du jour, de l'ordre de 0 à 6 km/h, voir graphique ci-dessous. Ici, le site 1 semble plus venteux, sans doute grâce au fait qu'il s'agisse d'un espace ouvert, mais on peut aussi supposer qu'elle bénéficie des brises thermiques provenant du parc situé en amont. Dans des études sur d'autres villes, on mesure des

vitesses de l'ordre de 2 à 4 m/s (7 à 14 km/h). Ces brises dépendent de la **topographie** : elles sont plus intenses là où la pente est plus importante. Ces vents jouent un rôle très important sur le confort thermique. Le graphique sur la page de droite montre que, dans un canyon urbain où la température de l'air est de 30°C, la température des parois (murs, sol) est de 40°C et l'humidité de 30%, la brise thermique peut faire **baissier la température ressentie de 2,5°C**.

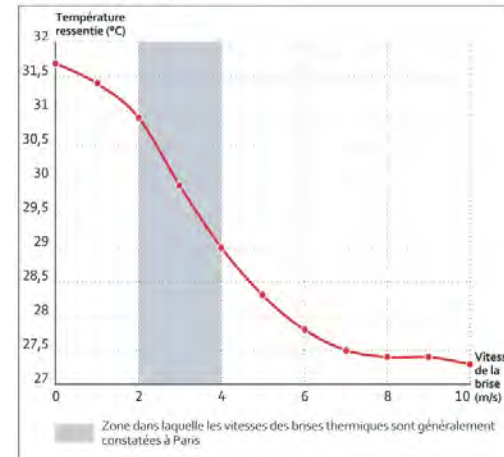
La présence **d'espaces verts** a un effet **accélérateur** de ces brises, mais

ce phénomène est encore mal documenté (voir page suivante).

Pollution atmosphérique

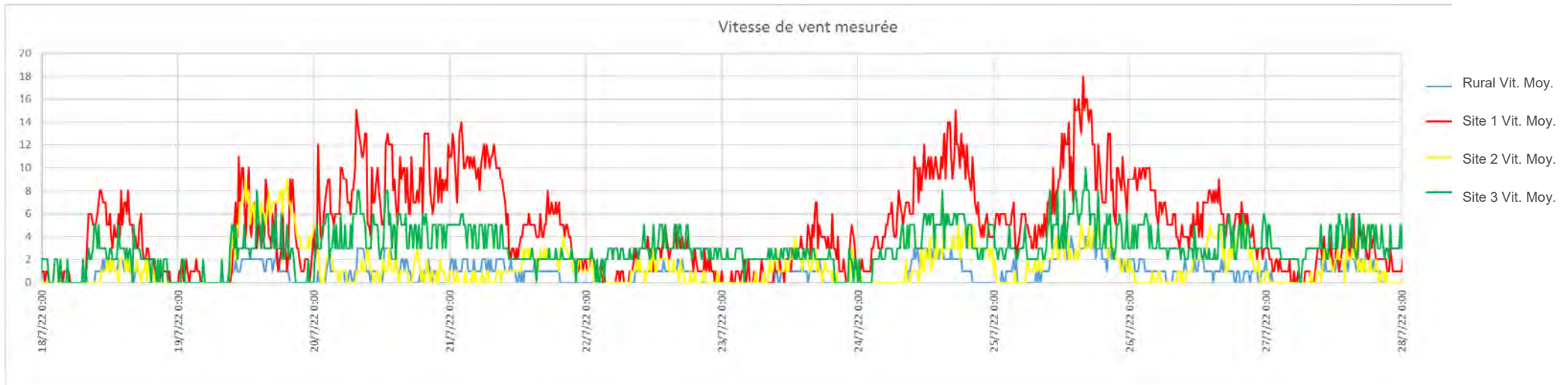
Ces courants d'air frais, en parcourant les pentes, charrient avec eux les polluants qu'ils rencontrent sur leur passage. Ils participent donc à la dispersion des polluants dans les pentes, mais convergent ensuite vers une zone topographique basse, par exemple une cuvette, point vulnérable où ces brises se dissiperont et où tous les polluants se concentreront.

Confort thermique selon la vitesse des brises thermiques



Influence des brises thermiques sur la température ressentie dans un canyon urbain (APUR)

Calcul de confort effectué pour une situation de canyon urbain dans lequel une brise thermique s'écoule

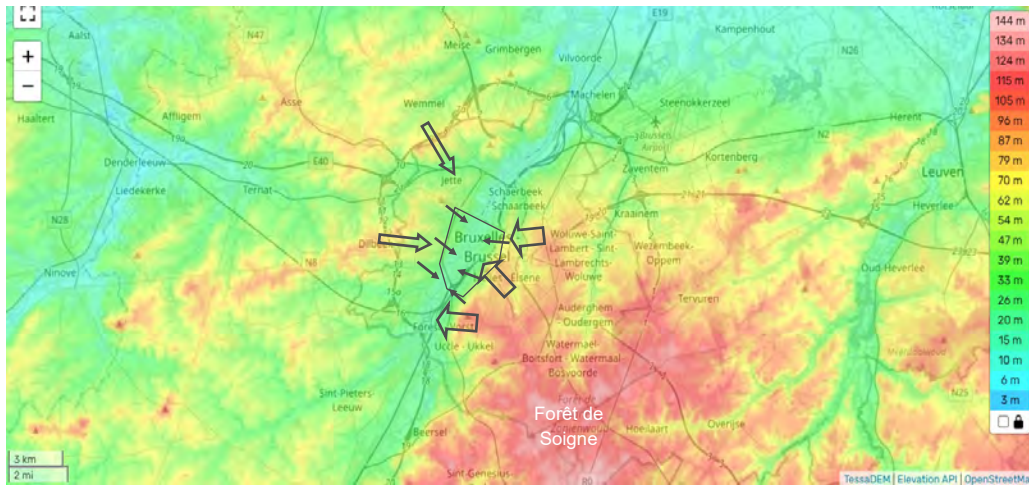


Mesure du vent durant la campagne expérimentale de l'été 2022 dans le cadre de la présente étude. Il est difficile de voir s'il y a un phénomène de brise thermique. On peut néanmoins observer que la vitesse de vent la nuit est très variable d'une nuit à l'autre et d'une station de mesure à l'autre. Elle est, en général, comprise entre 0 et 6 km/h.

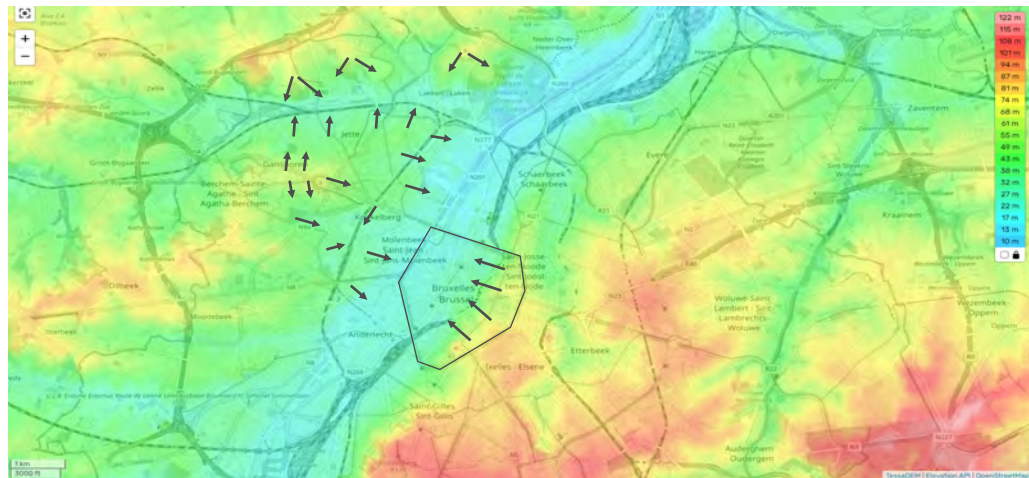
Topographie et étendue de la zone amont

Les brises thermiques sont engendrées par la topographie (comme les cours d'eau). Elles dévalent les pentes et convergent vers un point bas. La topographie de Bruxelles montre que ces brises devraient provenir du sud-est (Bois de la Cambre, ...) et du nord-ouest (parc de Laeken, ...) vers le bassin de la Senne.

Supposons une brise thermique de 6 km/h. Si elle prend place la nuit pendant une durée de 8 heures, l'air parcourt une distance de $6 \text{ km/h} \times 8 \text{ h} = 48 \text{ km}$. Cela signifie que l'air est charrié vers le bassin de la Senne dans un rayon de 48 km. On peut donc supposer que l'air de la forêt de Soigne peut rafraîchir une partie de la ville (sans toutefois aller au-delà de la vallée de la Senne).



Topographie de Bruxelles et ses environs (<https://fr-be.topographic-map.com>) et direction supposées des brises thermiques



Topographie de Bruxelles et ses environs (<https://fr-be.topographic-map.com>) et direction supposées des brises thermiques (zoom)

Utiliser les brises thermiques?

En supposant que le phénomène des brises thermiques soit suffisamment cartographié, mesuré et documenté, une solution pourrait consister à arroser les rues qui canalisent ces brises (avec de l'eau non potable issue d'un potentiel futur réseau, ou du canal, voir « Arrosage » page 70) afin d'accroître le phénomène et de créer de véritables courants d'air frais dévalant la ville.

On pourrait également, dans une optique d'aménagement à long terme, créer de véritables forêts urbaines qui créeraient une ventilation thermique radiales (schéma ci-contre) qui pourrait également favoriser les brises thermiques en s'ajoutant à l'effet topographique.

Pour favoriser les brises thermiques à travers les espaces verts et augmenter leur potentiel de rafraîchissement, il est important de ne pas surcharger l'espace d'obstacles au vent afin de laisser libre cours à la ventilation (image ci-contre).

A un niveau macroscopique, certains considèrent que le meilleur moyen de rafraîchir une ville est de privilégier des espaces verts longs et minces s'infiltrant dans le milieu urbanisé, plutôt qu'un grand parc très localisé (image ci-contre).

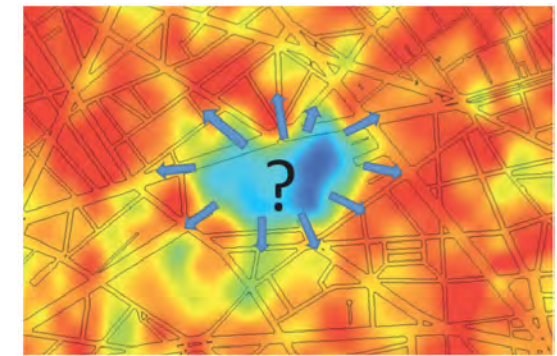
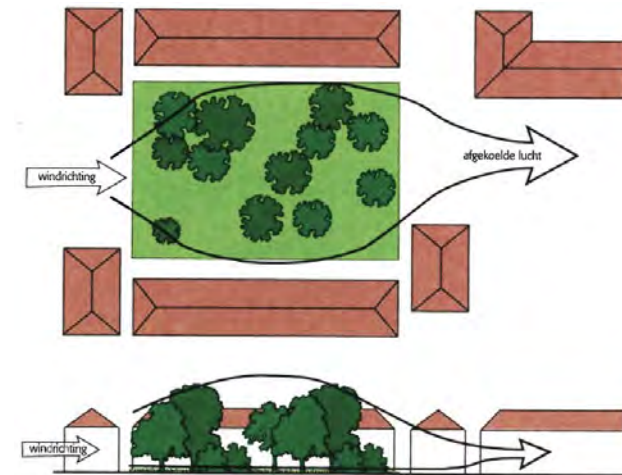
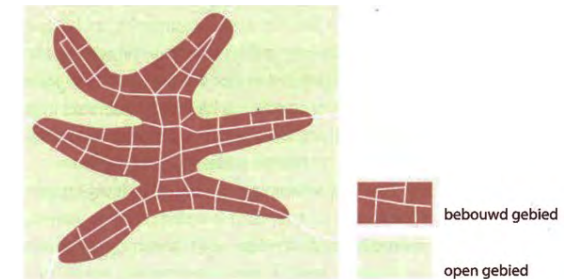


Illustration du phénomène de brise thermique radiale émanant d'un espace vert (phénomène encore peu étudié à l'heure actuelle) (APUR)



Pour optimiser le rafraîchissement d'un espace vert à travers la ville grâce à la ventilation, il convient de laisser des espaces libres sans obstacle pour laisser libre cours au vent (Lenzholzer, 2013)



La meilleure manière de rafraîchir un milieu urbain est sans doute d'introduire de longs couloirs verts parmi l'espace bâti (plutôt qu'un grand parc qui aura un effet beaucoup plus local) (Lenzholzer, 2013)

Forme urbaine

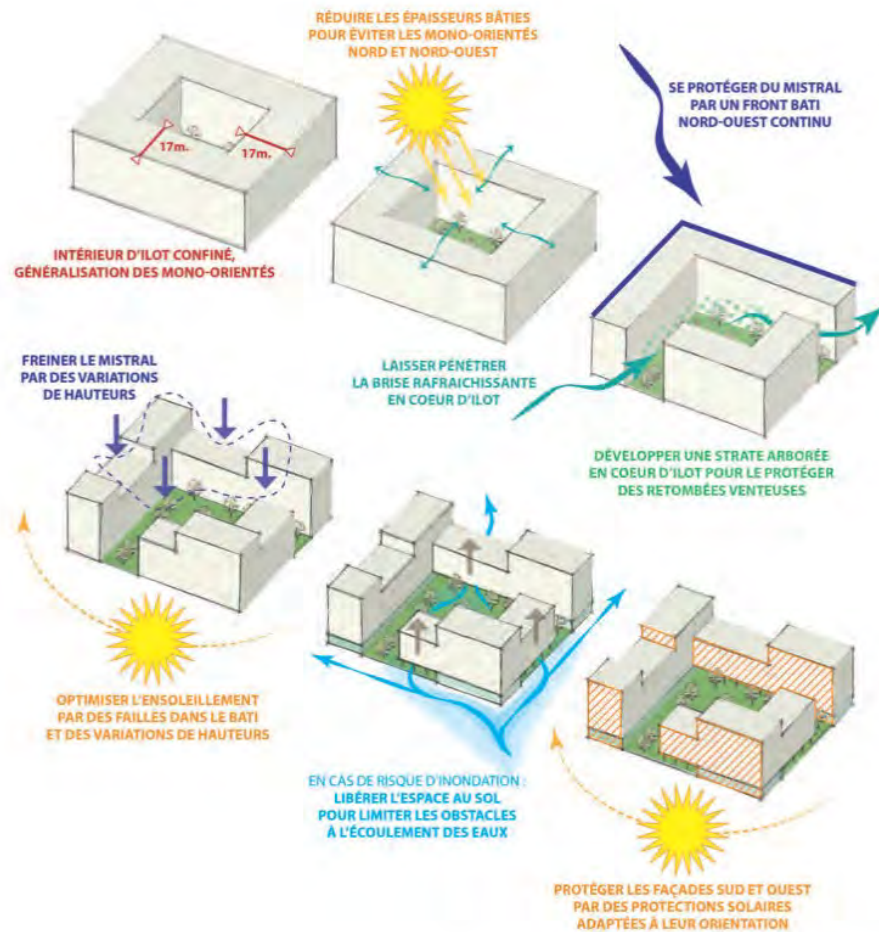
L'exemple du schéma ci-dessous montre comment la forme urbaine peut être travaillée de manière à favoriser la ventilation naturelle au sein d'un ensemble de bâtiments.

Forme urbain bioclimatique

L'image ci-dessous illustre un exemple de travail sur la forme urbaine pour la rendre bio-climatique. Cet exemple est propre au territoire de Marseille, où la

formule urbaine est orientée de manière à se protéger du Mistral venant du nord-ouest. Cette méthodologie est cependant transposable à Bruxelles où les vents dominants sont orientés

SSO.



Travail de la forme urbaine pour la rendre bio-climatique (AGAM)

Des « accidents de la trame » qui amènent l'air

Il est intéressant, d'un point de vue bio-climatique, de rompre une trame régulière pour y amener des creux, des vides. Ces variations de hauteur de gabarit rendent la ville plus *rugueuse*, moins *lisse*, et favorisent l'engouffrement du vent au niveau du sol, ce qui est favorable pour dissiper la chaleur qui s'y accumule ainsi que disperser les polluants.

Limiter l'emprise au sol

Limiter l'emprise au sol du bâti permet de favoriser l'écoulement des brises thermiques, ainsi que d'augmenter le potentiel de surfaces perméables et d'espaces verts.

Urban form and surface roughness

Buildings and GI of different height create a rough surface and more mixing of air



Street canyons of similar sized buildings with less roughness and less surface mixing



Avantage d'une forme urbaine irrégulière (rugueuse) qui permet le mélange d'air (Trees and Design Action Group Trust)



Exemple d'urbanisme poreux au vent avec emprise limitée au niveau du sol (<https://www.christiandeportzamparc.com/>)

Urbanisme poreux

Un urbanisme ouvert, poreux au vent, permettra une meilleure ventilation du tissu urbain, ce qui peut être très intéressant en période de forte chaleur pour disperser la chaleur emmagasinée par les matériaux urbains, mais aussi pour disperser les polluants présents dans l'air.

Concept de ville ouverte

Le concept d'urbanisme d'îlot ouvert et de la rue ouverte a été développé par plusieurs architectes et urbanistes. D'un point de vue ICU, cela est intéressant pour laisser s'écouler les brises thermiques rafraîchissantes, et le vent de manière générale (attention toutefois à ne pas créer des couloirs venteux qui pourraient devenir inconfortables en hiver). Le gabarit des bâtiments est hétérogène, créant ainsi des obstacles favorisant l'engouffrement du vent dans la canopée urbaine. De plus, l'empreinte au sol des bâtiments étant réduite, cela permet de développer plus d'espaces verts.

Il est donc possible de densifier la ville tout en se préservant du phénomène d'ICU si l'on prend garde de préserver des espaces ouverts végétalisés et des aérations naturelles qui considèrent, par exemple, la géographie des lieux, la topographie (brises thermiques), l'orientation et les vents dominants.

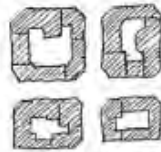
Quartier Massena (Paris)

« Comment ouvrir la ville à l'aléatoire, assembler le multiple : logements, bureaux, universités, au sein d'un quartier lisible et évolutif dans Paris ? Plutôt qu'un plan masse fixé, Christian de Portzamparc élabore ici une règle du jeu permettant des variations. Il met en pratique, à l'échelle d'un quartier, le concept qu'il a élaboré dans les années 80 : l'îlot ouvert et son corollaire la rue ouverte, diversifiée et lumineuse. Les bâtiments ne sont jamais mitoyens, ils ouvrent ainsi la rue sur les intérieurs d'îlots plantés de jardins. Ces bâtiments prennent la lumière

dans les quatre directions et selon des volumes dont l'architecture est libre. La grande variété des programmes, des volumes et des matériaux aussi est assemblée au long du « volume » unitaire de la rue. »

<https://www.christiandeportzamparc.com/>

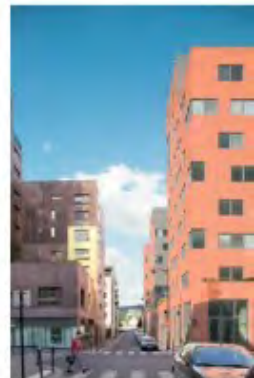
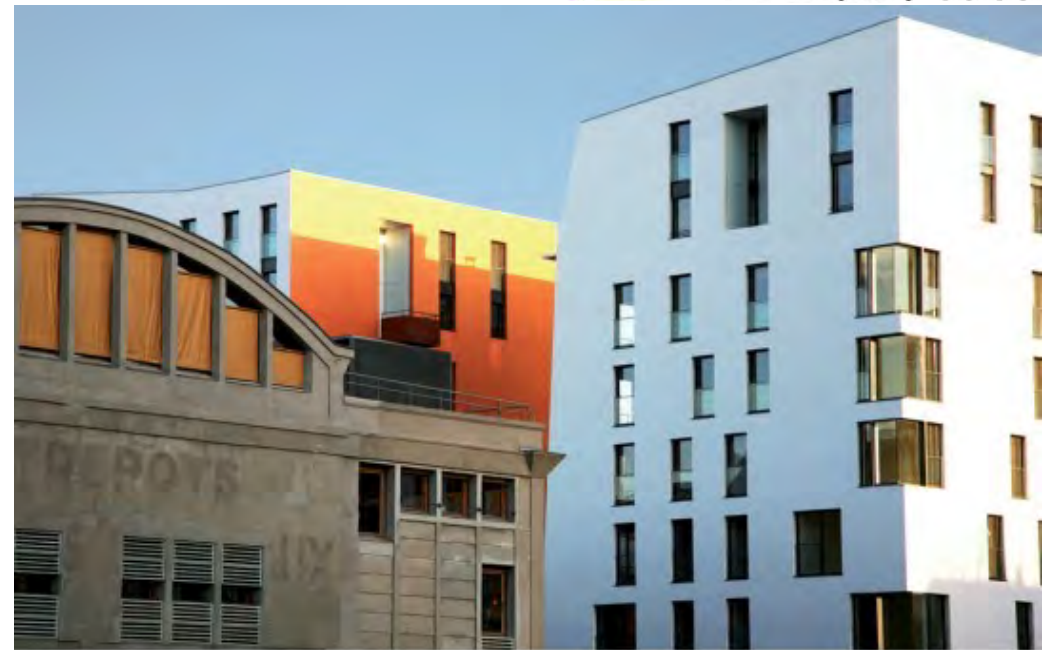
Trop peu de ventilation →



Trop ouvert, trop venteux →



Îlot ouvert : optimum →



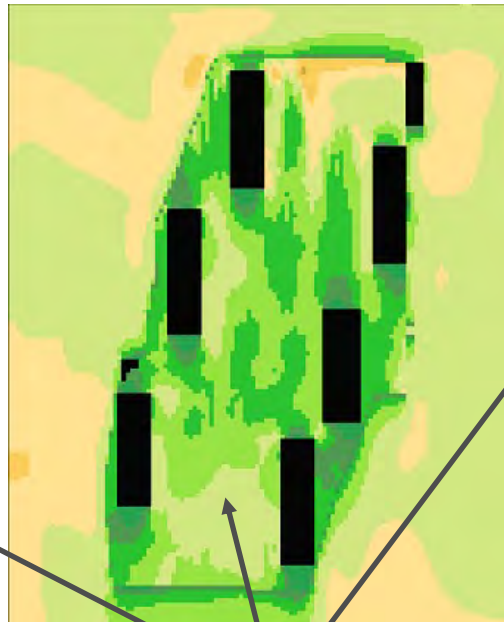
Quartier Massena (Paris) selon le concept d'urbanisme ouvert (<https://www.christiandeportzamparc.com/>)



Quartier Massena (Paris) selon le concept d'urbanisme ouvert ((<https://www.christiandeportzamparc.com/>))

Simulation des sites pilotes

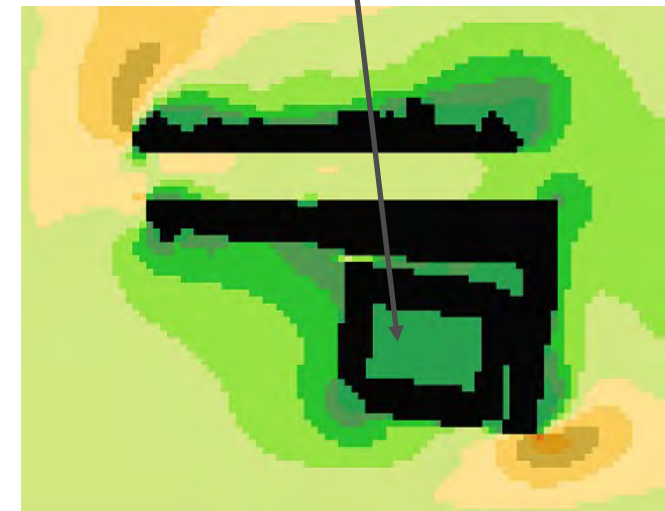
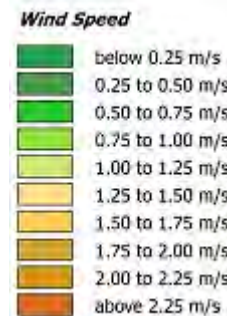
Des « windmaps » ont été produites et peuvent être analysées afin d'observer l'influence de la géométrie urbaine sur l'intensité du vent. On peut voir dans les images ci-dessous que le vent est plus élevé dans les espaces ouverts et est quasi nul dans les espaces fermés.



Espaces ouverts où l'air circule
(places, rues, ...)



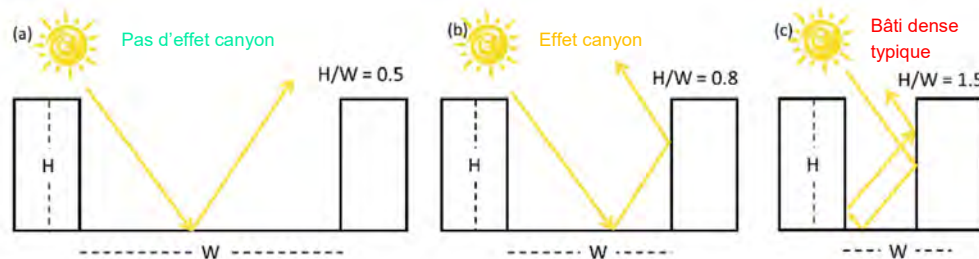
Espaces fermés : vi-
tesse de vent presque
nulle.



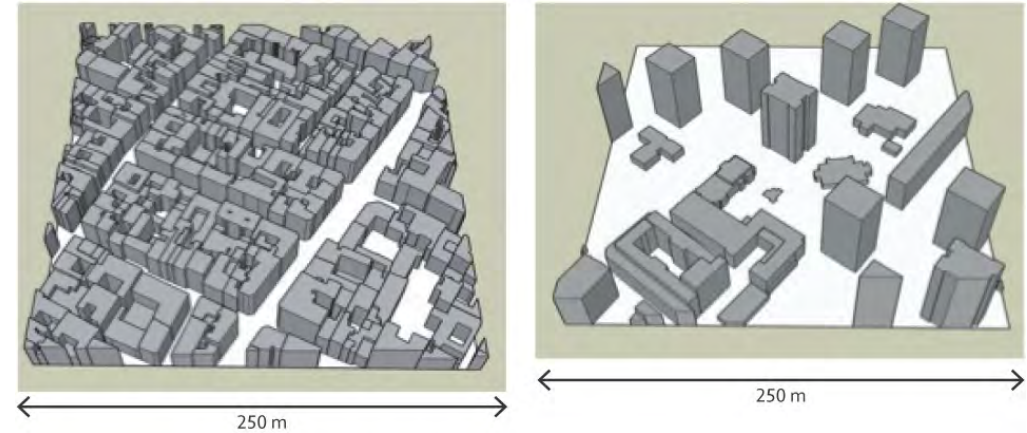
Effet canyon

L'effet canyon est lié à la morphologie urbaine ; il s'agit d'un resserrement du bâti trop important, ou autrement dit, d'une **rue étroite bordée de bâtiments élevés**. Bien que cela permet d'ombrager l'espace public en journée, l'effet de réflexion et de piégeage des rayons solaires provoque l'augmentation de la température, et le resserrement des bâtiments rend le refroidissement nocturne peu efficace. La **pollution** est également critique à cause du manque de ventilation ; les solutions d'atténuation de l'ICU devront prendre ce paramètre en compte.

En **journée**, dans les rues hautes et étroites, le rayonnement solaire « **ricoché** » d'une façade à l'autre, résultant en un échauffement dit *radiatif*, où la **chaleur, piégée entre les murs**, est stockée et s'accumule dans les matériaux urbains. Cela a pour conséquence l'augmentation de la température de l'air ambiant extérieur, et celle des matériaux.



La **nuit**, la chaleur accumulée dans les matériaux est reléguée dans l'atmosphère plus ou moins vite en fonction de la **part de ciel observable depuis le sol** (facteur de vue du ciel ou *sky view factor*), qui est réduite dans une rue haute et étroite. Cet autre phénomène favorise également l'effet d'îlot de chaleur urbain, par **incapacité des matériaux de se refroidir la nuit** en émettant un rayonnement infrarouge vers l'atmosphère. La **brise** est également plus **faible** car plus entravée par les bâtiments, et rafraîchit donc moins bien le tissu urbain en période nocturne.



Site dense et site dégagé (APUR)

Effet canyon :

Le bâti dense projette de l'ombre au niveau du sol en journée...

Mais le refroidissement nocturne est entravé par un « facteur de vue du ciel » assez faible.

Site dégagé :

En journée, le manque d'ombre crée de l'inconfort...

Mais le rafraîchissement nocturne est efficace (renvoi de la chaleur par rayonnement vers le ciel, brise thermique non entravée)

L'effet canyon peut être quantifié par le rapport entre la hauteur des bâtiment (« Hight ») et la largeur de la rue (« Width ») : le **ratio H/W**. Plus le ratio H/W est élevé (rue étroite bordée de bâtiments élevés), plus la forme urbaine aggrave l'ICU.

Notons également qu'une rue haute et étroite peut avoir une **répercussion négative sur l'ICU** (en termes de T° de l'air la nuit), mais néanmoins être **favorable** en journée (en termes de T° ressentie) car elle permet de projeter de l'**ombre** et de protéger ainsi les passants contre le rayonnement solaire. Cette capacité d'ombrage dépendra également de l'orientation de la rue.

Pollution

Les rues canyons sont des zones problématiques au point de vue de la pollution : l'air est piégé au fond de la rue et le vent n'arrive pas à brasser l'air suffisamment en profondeur pour disperser ces polluants. Une solution pour rétablir ce brassage consiste à faire varier le gabarit des bâtiments et arbres, pour créer des accidents de volumétrie, favoriser l'engouffrement du vent et augmenter les échanges entre l'air de la rue et l'atmosphère au-dessus des bâtiments.

IMPLANTATION D'ARBRES EN RUE

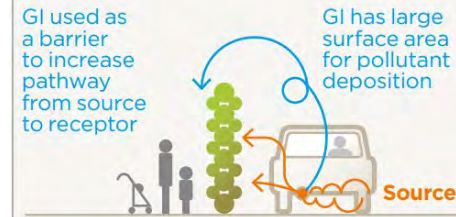


Le fait de faire varier les hauteurs des bâtiments et des arbres augmente le mélange d'air avec l'atmosphère et donc la dispersion des polluants. GI = green infrastructure (Trees & Design Action Group)



Une canopée dense dans une rue piétonne protège celle-ci de la pollution de l'air provenant des rues avoisinantes (image du dessus). En cas de trafic routier intense, il est préférable de laisser des espaces vides entre les arbres pour permettre une meilleure dispersion des polluants par ventilation de la rue (image du dessous) (Trees & Design Action Group)

Fig.3 GI can increase the pathway between source and receptor and provides a comparatively large surface area for pollutant deposition



La création d'une barrière entre la chaussée et le trottoir protège les usagers de la pollution émise par le trafic. Cela permet d'allonger le chemin entre la source de pollution (trafic) et les récepteurs (piétons, ...). (Trees & Design Action Group)



Ecran végétal rue Garibaldi à Lyon (Trees & Design Action Group)

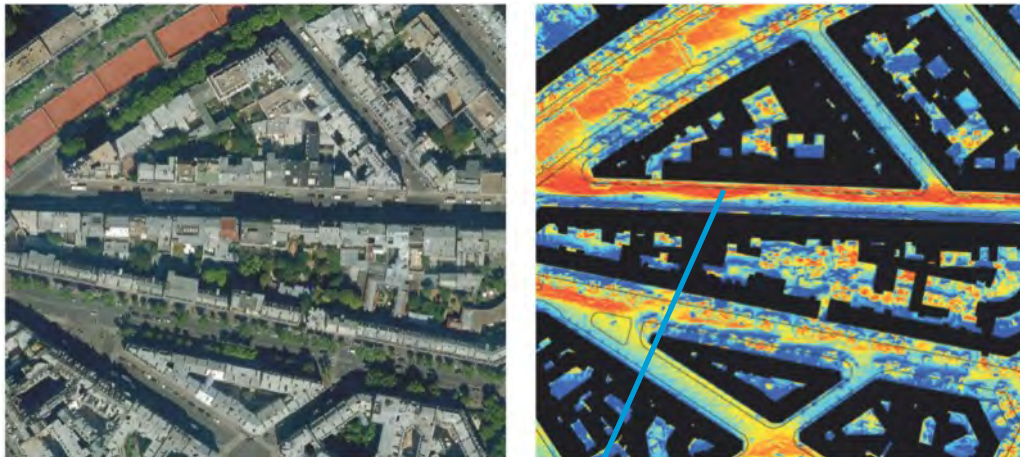


Ecran végétal rue de Bruxelles, Paris © APUR

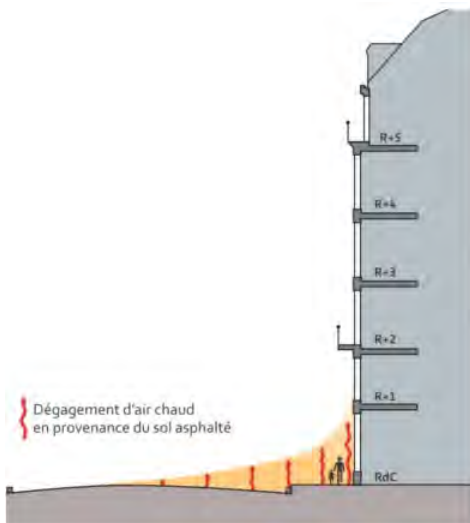
Etudes d'ensoleillement

Ensoleillement cumulé sur 24h

Une étude d'ensoleillement est toujours recommandée lorsqu'il s'agit de diagnostiquer les zones d'inconfort thermique. L'exemple ci-dessous montre l'exemple de l'ensoleillement cumulé lors d'une journée d'été. Ce type de carte donne une bonne idée des zones à risque d'inconfort thermique.



Ensoleillement cumulé lors d'une journée d'été, Rue Ampère et avenue de Villiers, Paris, orthophoto © InterAtlas (à gauche) et ensoleillement cumulé © APUR (à droite)



Problématique des pieds d'immeubles

Cette façade orientée au sud est fortement ensoleillée, ainsi que la moitié de la chaussée. Cela crée un point chaud au pied de l'immeuble, qui peut être qualifié de *piège radiatif* où les rayons thermiques se réfléchissent successivement entre la chaussée et la façade. (APUR)

Pieds d'immeuble ensoleillés

Les pieds de mur fortement ensoleillés constituent des zones très chaudes qui peuvent être atténuées par des mesures vertes qui vont ombrager les pieds de mur et trottoirs. Plus la végétation et l'effet d'ombrage est étendu (verticalement sur le mur et horizontalement sur la voie publique), plus les mesures seront efficaces. L'auvent est également très efficace, et permet aussi de porter de l'ombre aux piétons.



Cet exemple est très efficace dans le sens où il combine l'auvent, d'une part, qui protège le mur et le trottoir de l'ensoleillement ainsi que les usagers en journée ; et la végétation, d'autre part, qui complète l'effet rafraîchissant grâce à l'évapotranspiration. (Jardin Biopark, Paris, www.biodiversite-positive.fr, Guide BBP)



Façade végétalisée de lierre ; ombrage efficace du mur au niveau du rez-de-chaussée, qui ne s'échauffera pas. (www.biodiversite-positive.fr, Guide BBP)



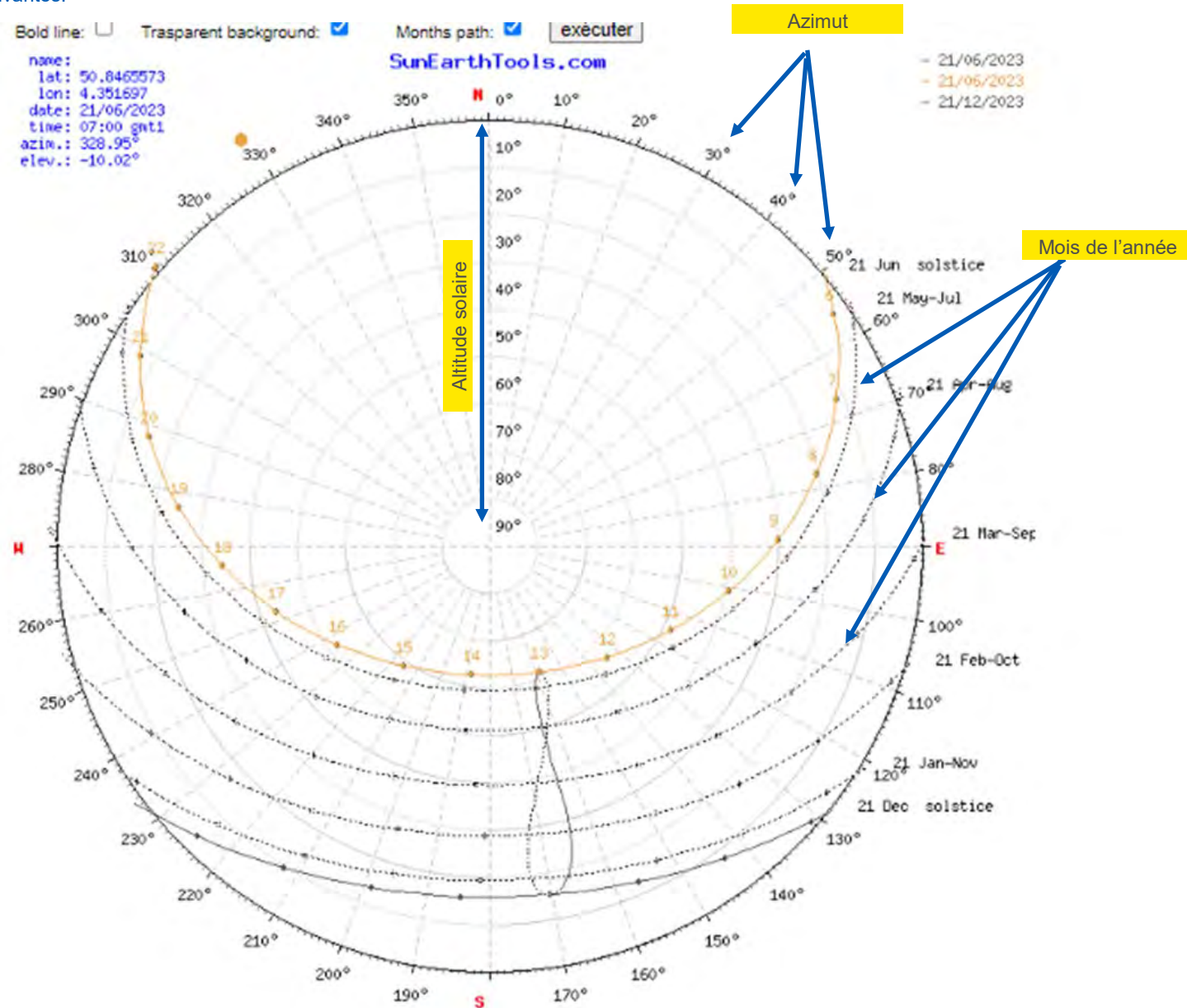
Auvent, place Saint-Hubert à Montréal (<https://www.mtl.org>)



Ce type de végétation est moins étendu et donc moins efficace, mais protège néanmoins une partie du mur du rayonnement solaire (<https://viva.villeurbaine.fr/>)

Diagramme solaire

Le diagramme solaire permet de réaliser des études d'ensoleillement très simples et rapides.
Deux exemples sont montrés dans les pages suivantes.



Ratio H/W

Les informations du diagramme solaire de la page de gauche peuvent facilement être reportées sur des schémas très simples du profil de la rue pour différents ratios H/W (Height/Width). Cela permet de repérer les zones ensoleillées comme les pieds d'immeubles qui pourraient être des points chauds.

2

Faç S

Faç N

H

W

9h et 18h (30°)

14h (62°)

Façade sud ensoleillée de 9h à 18h.

Le haut de la façade nord est ensoleillé le matin (5h30-9h) et le soir (18-22h)

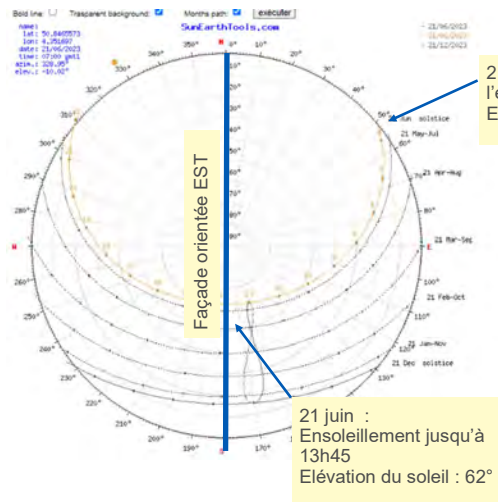
La chaussée n'est jamais ensoleillée

Là où la chaussée n'est pas ensoleillée, la plus-value des arbres est quasi nulle. On préférera alors des buissons et herbes adaptés à l'ombre.

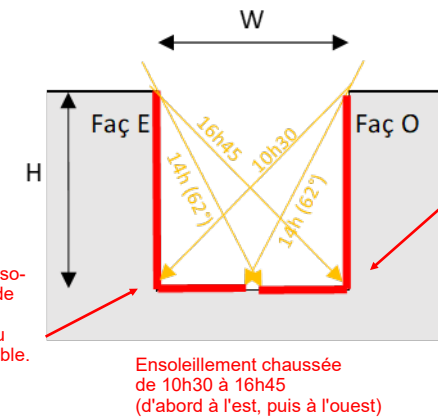
Ensoleillement façade EST / OUEST

Ratio H/W

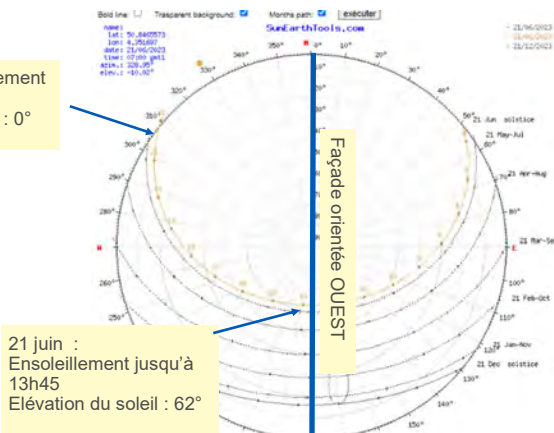
Diagramme solaire pour Bruxelles, heure d'été
(https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=fr)



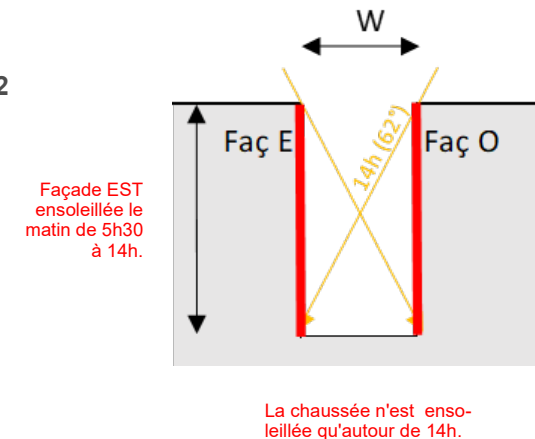
$H/W = 1$



21 juin : l'ensoleillement se termine à 22h.
Elévation du soleil : 0°



$H/W = 2$



Utiliser la morphologie

La morphologie urbaine peut grandement influencer le confort thermique diurne et nocturne. Le pouvoir d'action sur ce paramètre est bien sûr beaucoup plus restreint dans une zone déjà bâtie, mais quelques points d'attention sont utiles à mentionner. La possibilité d'intervention est bien plus grande dans le cas de la construction d'un nouveau quartier.

MORPHOLOGIE URBAINE (bâti et végétal)		
	BÂTI EXISTANT	NOUVEAU QUARTIER
Etude d'ensoleillement	Peut être utile pour identifier des zones chaudes à protéger, ou des zones naturellement ombragées par le bâti propices à l'aménagement d'îlot de fraîcheur.	Idem bâti existant. Protéger toutes les façades ensoleillées à l'aide de protections solaires extérieures (les protections intérieures n'ont pas d'effet sur le confort thermique).
Ratio H/W	Le ratio H/W est très difficile à modifier dans un tissu urbain existant.	$H/W \leq 1$
Gabarit du bâti	Difficile à modifier dans une zone bâtie. Eventuellement, un bâtiment peut être détruit pour laisser place à un espace vert, favoriser la ventilation...	Créer des variations de hauteurs pour favoriser l'engouffrement du vent, laisser un maximum d'espace libre au sol (espaces verts, infiltration, ventilation), créer un gabarit <i>poreux</i> . Prendre en compte la topographie pour favoriser l'écoulement de brises thermiques. Créer des couloirs végétaux au travers du bâti sera plus efficace qu'un grand espace vert compact.
Gabarit de la végétation	Faire varier les hauteurs pour favoriser l'engouffrement du vent au niveau du piéton. Laisser des espaces libres sans obstacles pour ne pas entraver les brises.	Faire varier les hauteurs pour favoriser l'engouffrement du vent au niveau du piéton. Laisser des espaces libres sans obstacles pour ne pas entraver les brises.
Source de pollution (trafic)	Ne pas trop couvrir une rue où la pollution est importante, cela emprisonnerait les polluants au niveau du sol. Laisser de la place pour la ventilation.	Favoriser la mobilité douce. Protéger les modes de déplacement doux de la pollution générée par le trafic routier (écran végétal, couverture végétale, ...).
Source de chaleur (rejet air conditionné)	Ne pas trop couvrir une rue où abondent les rejets chauds de climatisation au rez-de-chaussée (rue commerciale...), cela emprisonnerait l'air chaud au niveau du sol. Laisser de la place pour la ventilation.	Favoriser les rejets de chaleur en toiture plutôt qu'au rez-de-chaussée.

6

Typologie d'espace

Des solutions concrètes et arbres de décision sont présentés ici par typologie d'espace : l'îlot de fraîcheur, l'aménagement sur dalle, la cour d'école, la rue, le bâtiment, et enfin, le quartier neuf.

Îlot de fraîcheur

Un îlot de fraîcheur est un lieu dans l'espace public qui invite à s'arrêter et procure une sensation de fraîcheur, grâce à l'ombre, la présence d'eau, et les matériaux utilisés pour son aménagement. Il atténue l'ICU dans le sens où il procure aux usagers un espace plus confortable lors des jours de grande chaleur.



Place arborée - Place Dormoy - Bordeaux © Collectif Etc (AURBA 2020)



Préau végétalisé - Tours © S. Rouleau (AURBA 2020) Cette structure existante en béton est agrémentée de bignones qui forment un rideau et conservent la fraîcheur sous ce préau, en évitant aux courants d'air chaud de dissiper la fraîcheur. Du mobilier urbain pourrait améliorer le confort d'usage sous cet abri.



Pergola - Résidence Jas de Boussan - Aix en Provence © Baldassari-Sibourg architectes (AURBA)



Brumisation - aménagements estivaux - Paris Plage 2012 © Isabelle Zdanevitch (AURBA 2020)
Paris Plage a été l'un des premiers événements ayant recours à la brumisation et à l'aspersion pour rafraîchir les personnes. Ces aménagements comportent une dimension ludique et saisonnière.



Plateforme multimodale - place Pey Berland - Bordeaux (AURBA 2020) Le sol au pied des alignements de platanes de la Place Pey Berland est un stabilisé qui infiltre l'eau de pluie et participe à l'îlot de fraîcheur. Bien connu par les usagers pour ne pas être le plus abouti des aménagements (flaques et poussière), cette manière d'aménager reste très adaptée du point de vue de la lutte contre les ICU.



Structure d'ombrage et brumisateurs à Abu Dhabi, CBT Architects (Courtesy CBT)



Place arborée - Place Carnot - Carcassonne © Office de Tourisme de Carcassonne. (AURBA 2020)
Les grandes places plantées du Sud de la France sont de véritables modèles en matière de confort thermique. La place de l'arbre et de l'eau y est majeure. L'utilisation de matériaux sobres et poreux comme les pavés posés sur sable ou le stabilisé répond aussi à des exigences de coût pour traiter sobrement de si grandes surfaces.



Mail - marché - Bassens © Twitter-Alexandre Rubio (AURBA 2020)
Les marchés de plein-air et les champs de foire sont des espaces où la présence d'arbres s'avère indispensable sur de telles étendues. Bien implantés, ils guident les déambulations des usagers tout en apportant ombre et fraîcheur. L'espace étant souvent dégagé, il est possible d'y planter des arbres à grand développement (si le sous-sol le permet).



Tierce Forêt est la transformation du parking de la résidence de jeunes travailleurs Eugène Hénaff à Aubervilliers (région parisienne) en un espace piéton accueillant et agréable pour les résidents, les employés et les visiteurs de la structure. (www.construction21.org)



Des brumisateurs (actionnés par les utilisateurs) sont installés sur la Place de la Victoire à Bordeaux © GUILLAUME BONNAUD / MAXPPP

Concevoir un îlot de fraîcheur

Les éléments essentiels de l'îlot de fraîcheur sont l'**ombre**, de préférence apportée par de la végétation, le **mobilier**, tel un banc, et la présence d'**eau**.

OMBRE

Ombre VEGETALE (de préférence)

Prof substrat ≥ 1.5 m

Prof substrat = 1.0 m

Prof substrat = 0.5 m

(en théorie, 0.5 m disponibles partout, même si parking souterrain, ...)

Communication

Les choix sont à discuter en concertation : concepteurs, responsable urbanisme, gestionnaires de réseaux, ingénieur de voirie, spécialiste de l'arbre.

Strates de végétations

+ Buissons, herbes hautes

Choix essence

En fonction de : taille couronne, résistance à la sécheresse, transparence canopée, compatibilité avec type de sol en place, ... privilégier la diversité d'essences pour + de résilience.

Impétrans

Définir une zone pour impétrans à protéger des racines (géotextile, ...). Si possible : dévoiement + regrouper dans une tranchée commune, voire galerie multi-réseaux (travaux + importants).

Eau

Mise en place stratégie récupération eaux pluviales (non polluée, favoriser l'infiltration), et/ou arrosage en cas de sécheresse

Sol

Mise en place d'un sol de qualité (décompacté, ...) dans la région de développement racinaire

Trame brune

Connecter les fosses entre elles si plusieurs plantations

PERGOLA + PLANTES GRIMPANTES

(si la plantation d'arbres n'est pas possible)

Ombre NON-VEGETALE (si végétal pas possible)

VOILES, OMBRIÈRE...

+ Plantations

Quelques plantations seront fortement appréciées : herbes hautes, buissons, ...

Questions préalables :

- **Ensoleillement** : Identification des endroits très ou peu ensoleillés
- **Contraintes en sous-sol** : Localisation impétrans + autres contraintes en sous-sol (fondations, métro, parking, ...). Si dalle : voir « aménagement sur dalle » ci-après.
- **Quantité de sol** : Localisation du sol disponible pour plantations + profondeur
- **Qualité du sol** : sol pollué? drainant? Sol compact ou aéré? Riche en nutriments? pH?
- **Eau** : Disponibilité en eau pluviale ? Arrosage complémentaire à l'eau de ville en cas de sécheresse (raccord à l'eau de ville)?
- **Présence de bâtiments classés?**
- **Contraintes sonores** : y a-t-il des fonctions aux alentours qui pourraient souffrir de nuisances sonores (maison de repos, ...)?

Face à l'imprévu

Le sous-sol, bien qu'inventorié et documenté dans des plans où les réseaux et autres sont indiqués, ne reflètent parfois pas la réalité. On découvre alors lors du chantier que le sous-sol recèle des surprises qui pourraient compromettre le projet, surtout la plantation d'arbres. Il est dès lors important de se questionner sur la place de l'imprévu lors d'un projet d'aménagement. A quel point le projet peut-il être adapté? Quel est la part de budget à allouer aux imprévus? Ne faudrait-il pas prévoir un budget pour le dévoiement des impétrans dès le départ? (impétrans : voir solutions pages 82-83)

Eau pluviale

Si possible, récupérer l'eau des surfaces non perméables et non polluées dans une citerne qui pourrait servir à l'arrosage des végétaux (prévoir conduites de raccordement + pompe).

MOBILIER + EAU

Lieu de silence

Si pas de sources de bruit à proximité.
Lieu calme invitant à se reposer.

Mobilier (à l'ombre) : Bancs, ... en bois pour éviter les brûlures si zone ensoleillée

Eau : fontaine, brumisateur, ... (éviter les jeux d'eau qui peuvent être bruyants)

Lieu de rencontre

Le niveau sonore du lieu sera compatible avec les fonctions aux alentours (exemple : pas de terrain de basket à côté d'une maison de repos, ...).
Lieu pouvant être plus ou moins animé permettant aux gens de se rencontrer, aux enfants de jouer...

Mobilier (à l'ombre) : Bancs, jeux, ... en bois pour éviter les brûlures si zone ensoleillée

Eau : fontaine, brumisateur, jeux d'eau...

Aménagement sur dalle

Les aménagements urbains sur dalles (parkings souterrains, urbanisme de dalle...) présentent la particularité d'être déconnectés du sol et de la pleine terre. Cela représente une certaine complexité pour l'implantation de végétation, mais il existe toutefois quelques solutions qui permettent d'atténuer le stress thermique.

Seul l'espace public est traité ici, les solutions touchant au bâti seront abordées dans la partie correspondante.

Exemple 1 : dalle de Beaugrenelle, Paris (rénovation)

Dans le 15^e arrondissement de Paris se trouve la dalle du Front de Seine - Beaugrenelle. Elle subit de grands travaux entre 2010 et 2015 (24 millions € au total). La dalle, dont les espaces extérieurs représentent 2,5 ha, présentait déjà des fosses coniques de 1,20 m de profondeur, ce qui permettait la plantation d'arbres, et la structure a en plus été renforcée afin de pouvoir accueillir de nombreux autres arbres. Aujourd'hui, la zone verte de la dalle remplit une triple fonction de rafraîchissement de l'air urbain, d'accueil de la biodiversité et de création de lieu de rencontre pour les riverains.



Dalle Beaugrenelle Paris ©PariSeine, ©Franck Badaire, ©Emeric Fohlen-Beaugrenelle en fête 2022, ©Sarah Vervisch-Beaugrenelle en fête 2020 (<https://pariseine.fr/>)

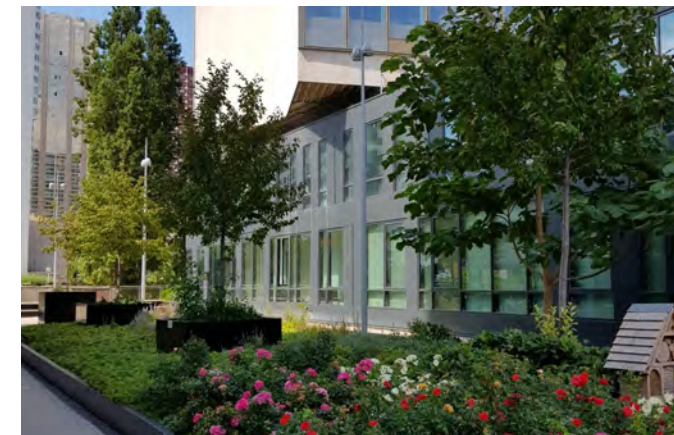


Dalle du Front de Seine - Beaugrenelle, Paris 15^e © Franck Badaire (www.adaptaville.fr)

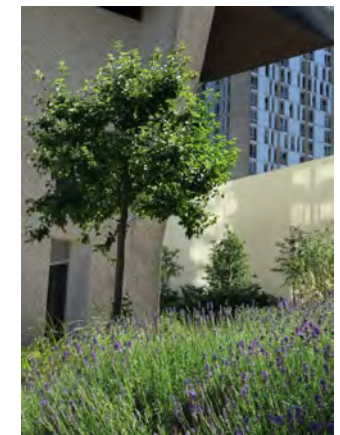


Renforts de la dalle dans le parking sous les fosses de plantation à Beaugrenelle (Paris 15^e) © APC (www.adaptaville.fr)

<https://pariseine.fr/>



<https://pariseine.fr/>



<https://pariseine.fr/>

Exemple 2 : Jardin Atlantique, Paris (dalle neuve)

Le jardin Atlantique est un jardin suspendu de 3,5 hectares construit en 1994 sur une dalle qui recouvre les quais de la gare Montparnasse, à Paris, qui étaient auparavant à l'air libre. Il est ici question d'une dalle neuve, qui a pu être dimensionnée pour porter arbres et végétation.



Jardin atlantique (<https://www.paris.fr/>)



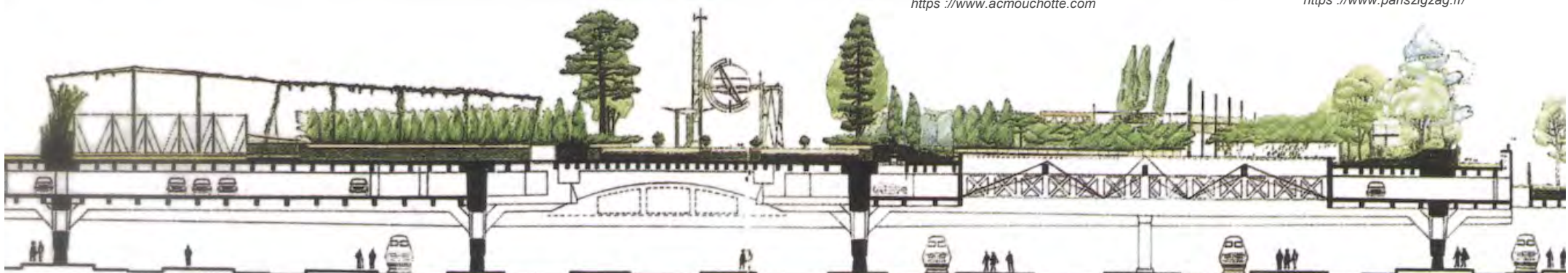
La gare Montparnasse et le jardin Atlantique vus depuis la tour Montparnasse (<http://lavoixdu14e.blogspot.com/>)



<https://www.acmouchotte.com>



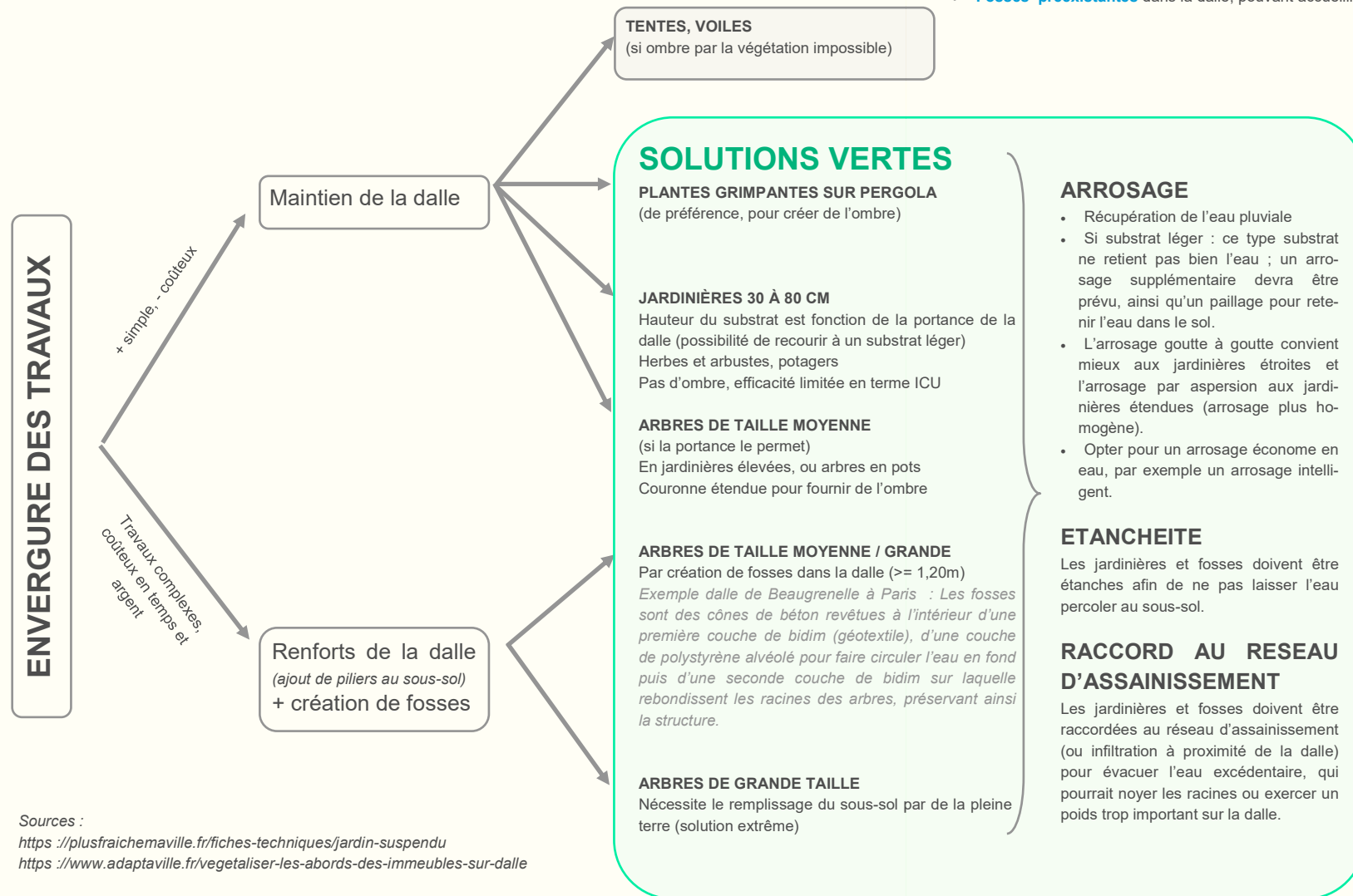
<https://www.pariszigzag.fr/>



Dessin montrant l'étagement des quais de la gare, du parc de stationnement et du jardin (<https://fr.wikipedia.org/>)

Rénover une dalle

Dans le cas d'une rénovation d'espace public sur dalle, le schéma de décision repose sur l'envergure des travaux projetés. La dalle peut soit être maintenue telle quelle, soit être renforcée. Les possibilités de végétation seront alors différentes. Quelle que soit l'option choisie, la question de l'eau devra être anticipé dès le départ (arrosage, étanchéité, raccord au réseau d'assainissement).



Sources :
<https://plusfraichemaville.fr/fiches-techniques/jardin-suspendu>
<https://www.adaptaville.fr/vegetaliser-les-abords-des-immeubles-sur-dalle>

Questions préalables :

- Voir également « Îlot de fraîcheur » (questions préalables + « face à l'imprévu »)
- Portance de la dalle** : étude de portance (quel est le poids de végétation possible à ajouter et à quel endroit + poids de l'eau de pluie éventuellement infiltrée et récupérée)
- Etendue de la dalle** (jusqu'où la dalle s'étend-elle? y a-t-il une zone de pleine terre à proximité pouvant accueillir des arbres?)
- Zones d'infiltration** qui jouxtent la dalle? (possibilité d'infiltrer l'eau de pluie à proximité de la dalle?)
- Impact des immeubles** sur la végétation qui sera plantée : zones toujours (ou presque) à l'ombre, courants d'air importants, zones fortement protégées de pluie, ...
- Fosses préexistantes** dans la dalle, pouvant accueillir d'éventuels arbres ?

Arbres

Dans le cas particulier d'un aménagement sur dalle, il est compliqué de planter des arbres, pour des raisons d'enracinement (nécessité de créer une fosse d'au moins 1,20 m pour de petits arbres) et de portance (nécessité de renforcer la dalle par l'ajout de piliers en sous-sol). Bien que cela ne soit pas impossible, ces solutions techniques sont complexes et coûteuses. Pour créer de l'ombre, il est préférable de recourir aux plantes grimpantes sur pergola, ou d'aménager un îlot de fraîcheur dans un espace qui se trouve naturellement ombragé par les bâtiments. S'il existe un endroit de pleine terre à proximité de la dalle, il est peut-être plus judicieux de planter des arbres à cet endroit, plutôt que d'entreprendre des travaux complexes dans la dalle elle-même.

Végétation

Privilégier les espèces résistantes et adaptées à une faible épaisseur de substrat, à systèmes racinaire peu important et faibles développements : cerisiers à fleurs, érables à peau de serpent, graminées et vivaces, fougères pour l'ombre, ... Beaucoup d'essences plantées en ville supportent la bonzification sur dalle / en fosse : pins, micocouliers, érables, chêne vert, féviers, polownia, figuiers, platane, ...

Compostage

Dans une démarche de gestions écologique, prévoir des zones de compostage (exemple pour la dalle Beaugrenelle à Paris : les jardiniers n'évacuent aucun déchet vert issu de l'entretien des plantations, tout est composté sur place ; le compost est réutilisé pour la végétation ainsi que dans le potager en permaculture, géré par les jardiniers).

Mobilier + Eau

La présence de mobilier et un point d'eau seront fortement appréciés (voir point « Îlot de fraîcheur »).

Rue

La végétalisation des rues permettra de créer un maillage constitué de véritables couloirs verts et rafraîchissants au sein de la ville. La tendance à réduire le trafic automobile est une opportunité pour rendre ces voies plus vertes et plus accueillante pour les usagers.



<https://www.aquitaineonline.com/>



ANR écoville, Topager.com



© PIERRE CHANTELOIS



Boulevard périphérique végétalisé. © Mairie de Paris © PIERRE CHANTELOIS

Arbre et largeur de rue

La largeur de la rue sera un des facteurs déterminant dans la possibilité de planter des arbres à grand, moyen ou petit développement. On peut considérer qu'à partir d'une largeur de 11 m, il est possible d'implanter des arbres petits ou moyens, et que les rues de plus de 19 m de large peuvent accueillir des arbres à grand développement.

Arbres à petit, moyen et grand développement : voir page suivante.



Exemple de largeur de rues à Laeken

Largeur de rue	Possibilité plantation d'arbres	Exemple	Potentiel de verdurisation à Laeken
> 19 m	Arbres de grand développement Double ou simple alignement de part et d'autre de la rue 	 Bvd Voltaire, Paris, 30 m	 Rue Claessens, 29 m
11 à 19 m	Arbres de moyen et petit développement Alignements unilatéraux ou plantations discontinues sur la bande de stationnement, sur un trottoir large ou au gré d'un retrait d'alignement 	 Rue Boutebrie, Paris, 12,5 m	 Rue de Wautier, 14 m
< 11 m	Végétation ponctuelle Petits arbres ou buissons de manière ponctuelle 	 Rue des Rosiers, Paris, 10,8 m	 Rue de la Comtesse de Flandre, 10 m

Les **voies de plus de 19 m de large** peuvent normalement accueillir une simple ou double plantation d'arbres d'alignement de grand développement. Dans l'alignement, il est important de prévoir une strate arbustive ainsi qu'une strate herbacée, pour constituer des couloirs de biodiversité, et pour augmenter la résilience du sol et de la végétation autour des arbres. Il convient de profiter de la largeur de ces rues pour y créer de véritables promenades urbaines pour les usagers, ce qui passera par l'élargissement des trottoirs, le renforcement de l'ombre portée par les arbres, ainsi que la présence de mobilier de confort.

Les **voies entre 11 et 19 m de large** pourront être plantées unilatéralement, ou éventuellement de manière ponctuelle.

Dans les **rues les plus étroites (< 11 m)**, la plantation est plus difficile, même pour de petits sujets. La végétation pourra prendre place ponctuellement, il faut pour cela tirer parti des places, placettes, retraits d'alignements, parvis et esplanades pour implanter une végétation. Il s'agit d'adopter une stratégie de petite échelle, et opter pour de la végétation de taille adaptée (buissons, herbes hautes, ou éventuellement arbres de petite développement).

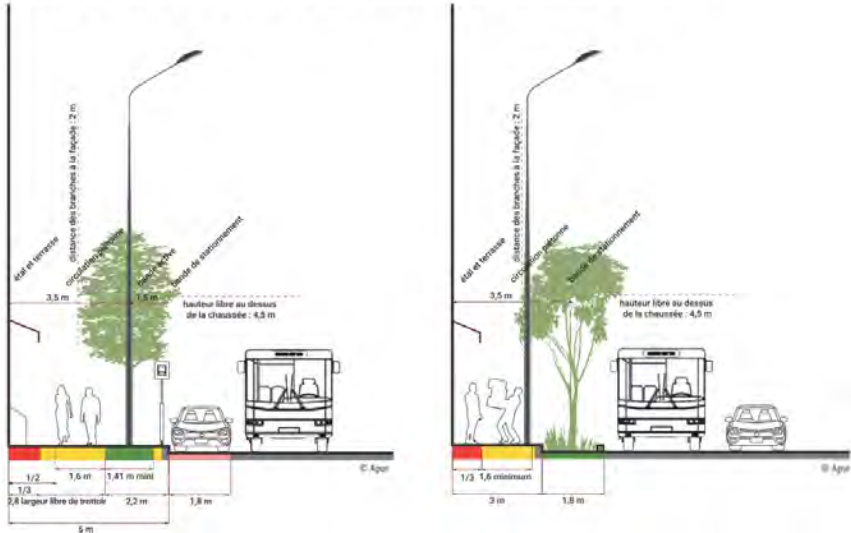
Arbres à petit, moyen et grand développement

Les arbres peuvent être classés en 3 catégories : les arbres à petit, moyen et grand développement.

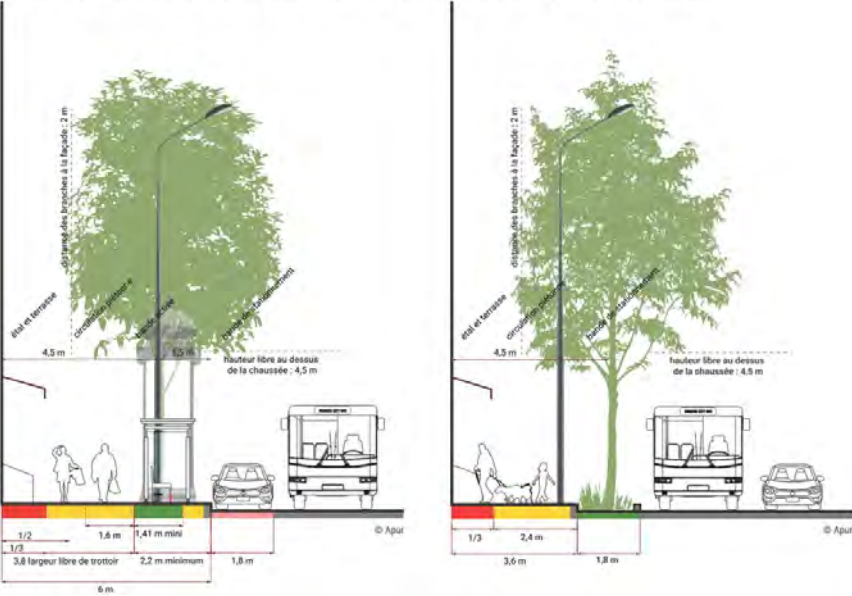
Le tableau ci-dessous illustre les règles de distances à respecter dans la ville de Paris (tableau ci-dessous, source : APUR).

	Hauteur de l'arbre	Distance min entre branches et façade	Distance min entre plantation (tronc) et façade	Distance min entre plantation (tronc) et trottoir	Inter-distance min entre deux arbres
Arbres de petit développement	5 à 10 m	2 m (taille régulière de l'arbre, ou choix d'essence adapté)	3,5 m	1,5 m	4 à 6 m
Arbres de moyen développement	10 à 15 m		4 m	1,5 m	6 à 8 m
Arbres de grand développement	> 15 m		6 m	1,5 m	8 à 10 m

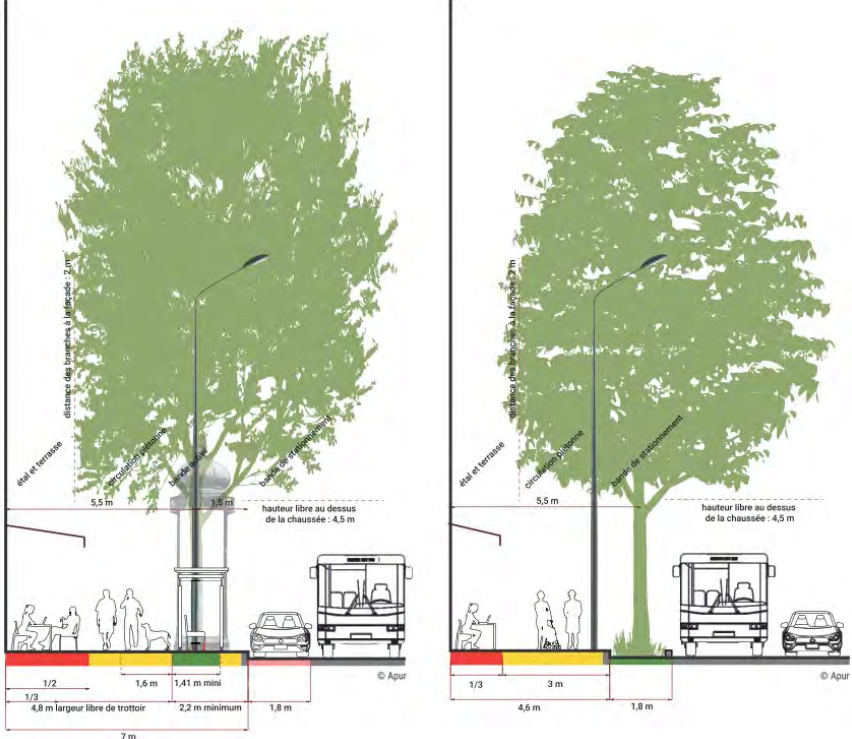
Coupe de principe pour un arbre de petit développement de 5 à 10 m de hauteur



Coupe de principe pour un arbre de moyen développement, de 10 à 15 m de hauteur



Coupe de principe pour un arbre de grand développement, de plus de 15 m de hauteur



Tirer profit des petits espaces

Dans les milieux urbains denses, souffrant de carence en espaces verts, il est important de développer une stratégie de petite échelle et tirer profit de chaque espace, comme des retraits d'alignements, placettes, parvis, etc.



Aménagement Place Fréhel, Paris 20e



Retrait d'alignement végétalisé, rue Pradier, Paris 19e

Rues aux écoles

La Ville de Paris a initié un projet de piétonisation des voies aux abords d'écoles maternelles et primaires, dans le but de sécuriser le chemin pour les enfants, mais également pour lutter contre la pollution et l'ICU grâce à la plantation d'arbres et d'espaces végétalisés de pleine terre.



Rue Milton, Paris 9e
(source : Guillaume Bontemps, Ville de Paris)



Rue Pierre Foncin, Paris 20e
(source : Joséphine Brueder, Ville de Paris)

Rues jardin

Des voies courtes, de desserte locale, impasses, ou peu empruntées par les véhicules ont un fort potentiel de développement pour devenir des rues piétonnes ou semi-piétonnes, et constituer des espaces publics jardinés.

Ces rues deviennent ainsi propices à la vie de quartier, elles sont fraîches et conviviales. L'idéal est de combiner :

- Désimperméabilisation du sol ;
- 3 strates de végétation (arborée, arbustive et herbacée) ;
- ombre par les arbres et/ou les bâtiments ;
- éventuellement et ponctuellement, des fontaines, brumisateurs ;
- aménagement multigénérationnel et non genré.



Rue Kléber, à Bordeaux (www.caue-observatoire.fr)



Rue Kléber, à Bordeaux (www.caue-observatoire.fr)

Corridors de biodiversité

Un corridor de biodiversité, ou corridor écologique, est une continuité verte reliant plusieurs réservoirs de biodiversité entre eux (parcs, jardins, ...), permettant aux espèces de se déplacer de l'un à l'autre.

Continuité verte du PRDD

La continuité verte du PRDD (Plan Régional de Développement Durable), représenté en rose dans l'image ci-contre, définit un réseau écologique au sein de la Ville de Bruxelles.

Il est important, dans ces tronçons, de diversifier les strates de végétations (arborée, arbustive, herbacée) et les essences végétales (arbres fruitiers, plantes nectarifères, arbustes à baies, ...). Les pieds d'arbres doivent être végétalisés et désimperméabilisés.

Autres corridors possibles

Les rues proches des espaces verts privés et publics peuvent également participer à l'extension de la biodiversité au-delà de ces espaces.

Là où une continuité ne peut pas être assurée, par exemple à cause de l'interruption du couloir vert par une rue, un bâtiment, ..., on peut procéder à une extension par « pas japonais », c'est-à-dire une végétation discontinue. Ce serait le cas, par exemple, de la végétalisation d'une rue jouxtant un centre d'îlot végétal (privé ou public), mais séparé de celui-ci par une rangée de maisons.



Corridor de biodiversité, Rue Vercingétorix, Paris 14e



En rose : continuité verte du PRDD (geodata.environnement.brussels)



Tonnelles végétales - Place de Loreto - Mexique © Lavidablabla (AURBA 2020)



Rue commerçante - rue Herning - Danemark © Lindsay Frost (AURBA 2020)

Les secteurs commerçants sont désertés lors des canicules. Associer îlot de fraîcheur et activités économiques est crucial pour assurer un minimum de résilience à ces espaces souvent minéralisés (par souci d'entretien et d'accès). La végétation apporte une dimension ornementale et esthétique qui favorise leur fréquentation et le confort des terrasses.



Pergola - Mint Plaza - San Francisco © CMG Landscape Architecture (AURBA 2020)

La Mint Plaza est un cœur d'îlot situé sur un parking souterrain au cœur de San Francisco. Afin d'ombrager une façade commerçante et abriter du mobilier urbain de pause, une pergola de grande envergure a été conçue pour y faire grimper de la bignone. Malgré la minéralité du projet, cette solution apporte une fraîcheur d'appoint.



Rue végétalisée - boulevard et piste cyclable centrale - Lyon © Métropole de Lyon - Laurence Danière (AURBA 2020)

L'accompagnement des infrastructures de transport et voies dédiées aux mobilités actives par de la végétation est un enjeu qui remplit plusieurs objectifs. Les surfaces bitumées sont abritées du soleil et dégagent ainsi moins de chaleur nocturne. Les usagers qui empruntent les voies dédiées ne sont pas découragés en été car ils peuvent y circuler à l'ombre.



Boulevard Pasteur, Paris (<https://www.cgconcept.fr/>)



Rue du Trésor, Paris (<https://vivrelemarais.typepad.fr/>)



Le choix d'essences méditerranéennes pour favoriser la résistance aux sécheresses, Méridia, Nice (TRIBU)



Rue-Jardin Sadi Carnot, Montrouge (<https://www.ville-montrouge.fr/>)



Rue verte Saint-Christophe, Montréal (stchristophevert.files.wordpress.com)



© Ville de Nice



© Jean-Pierre Viguié



© Muriel_Chaulet

Cour d'école / crèche

Qu'est-ce qu'une « cour oasis »

Une cour « Oasis » est une cour aménagée en îlot de fraîcheur ; elle est végétalisée, ombragée, son sol est perméable et elle permet le rafraîchissement par l'eau. Elle est résiliente face au changement climatique, et a également le but pédagogique et social d'améliorer le bien-être des enfants et adolescents, de les sensibiliser à l'environnement, et de réduire les inégalités de genre. Elles sont idéalement ouvertes aux habitants ou associations de quartiers dans les zones vulnérables (page 10) et les zones de carence en espaces verts. Les rues adjacentes aux écoles peuvent également faire l'objet d'aménagement de manière à végétaliser et apaiser la circulation (« rues aux écoles », page 153). Commençons par quelques exemples en guise d'illustration.

Ecole maternelle Emeriau (Paris)

« Après une phase de concertation et de co-conception avec les élèves accompagnée par le CAUE de la Ville de Paris, qui a duré de septembre 2019 à février 2020, le chantier s'est mis en place à l'été 2020.

La première phase du chantier a consisté à débitumer la cour. L'asphalte a été retiré sur la totalité de la cour, et la couche de béton en dessous, retirée dans les futures zones de terre et copeaux.

Les travaux de terrassement ont ensuite eu lieu. Dans cette école, une rivière pédagogique a été créée avec des roches et des galets, qu'il a fallu délimiter pendant le terrassement. Des drains ont été posés dans le sol afin de permettre à l'eau de s'évacuer en cas de très fortes pluies. Des matériaux présents sur place ont été réutilisés, c'est le cas de briques en terre cuite qui ont servi à limiter l'espace de pleine terre côté rue agrandi pour servir d'espace pour la classe dehors.

Des cheminements ont ensuite été créés, à l'aide de rondins notamment, et ont été recouverts de stabilisé clair. De la terre végétale a été apportée sur certaines zones pour ensuite créer un jardin de pluie et des zones de copeaux. Une passerelle en bois a été installée ensuite au-dessus de ce

jardin humide. Dans la zone qui accueille la nouvelle via ferrata, des copeaux amortissants ont été posés. Images : Sur la zone qui accueille le nouveau hamac, un paillis naturel recouvre le sol.

Des jardinières en bois ont aussi été installées avec un système d'arrosage goutte à goutte intégré.

Une cuve de récupération des eaux de pluie a été posée et recouverte de bardage en bois. »

recreation
Images :
<https://sites.google.com/caue75.fr/cours-oasis-emerau/accueil>



Via ferrata

<https://www.adaptaville.fr/amenagement-ecologique-cour-de->



Un amphithéâtre en rondins, des grumes et des composteurs ont été placés dans l'espace qui accueillera la classe dehors. Pour le traverser, un cheminement en pas japonais a été créé.



Les buttes et dénivelés sont source de jeu pour les enfants, comme ici où un tunnel est placé sous un pont



La rivière pédagogique, quant à elle, fait l'unanimité dès que l'eau y ruisselle



Ecole A la Croisée des Chemins, Bruxelles (<https://ecobuild.brussels/>)



Piste de vélo traversant la lisière de l'aire arborée et l'aire de jeux (École maternelle Maurice d'Ocagne, paris) © Théo Ménivard



Multi accueil Quai des bambins (crèche à Bordeaux) © Ville de Bordeaux (Thomas Sanson)



École élémentaire Jacques Prévert, vue de la cour et de la diversité des sols © Ville de Bordeaux (Thomas Sanson)

Sols naturels et perméables

Les retours d'expérience d'aménagements de cours Oasis en France ont permis de mettre en évidence certaines considérations à prendre en compte lors du choix du revêtement de sol. En voici une synthèse.

Pleine terre

Recouvrir de paillis pour protéger contre le gel et nourrir par ajout de compost.



Terre végétale, école Stadsmus, Bruxelles © CAUE de Paris

Sols enherbés

Ne convient pas aux espaces avec piétement intensif et nécessite un entretien régulier et arrosage en cas de sécheresse.



Pelouse, cour Oasis de l'école Emériau © Laurent Bourgogne, Ville de Paris

Copeaux de bois et paillis

Nécessite un brassage régulier (assuré par le enfants qui y jouent), surfacage annuel, remplissage régulier pour remplacer les premiers cm piétinés et

compactés (prévoir espace de stockage dans l'école pour sacs de recharge). Ne convient pas à une zone proche des entrées du bâtiment (propagation des copeaux à l'intérieur). A placer dans les zones ensoleillées ou semi-ombragées pour éviter l'humidité.



Copeaux en bois © Ville de Paris

Sable

Ratisser régulièrement pour enlever les débris et feuilles mortes.

Gravier végétal

Morceaux de coques de noyaux de fruits polis. Imputrescible, résiste au gel.

Recharge tous les 6 à 10 ans. Emmagasinage peu la chaleur.

Matériaux renouvelables et recyclés,



Gravier végétal © CAUE de Paris

impact environnemental faible.

Gravillons

Très bonne perméabilité. Ratisserie régulière pour retirer les morceaux de végétaux. Recharge quand des trous se forment. Recyclables (réduction de l'impact environnemental).



Gravillons © CAUE de Paris

Sols en bois

Attention à la glissance du bois (inadapté aux espaces dynamiques).



Sol en bois © Laurent Bourgogne, Ville de Paris

Terrasse en bois

Pavage en bois

(perméable par ses joints en sable)

Cheminement en bois



Cheminement en bois © CAUE de Paris

Pas japonais en rondins de bois



Rondins de bois © CAUE de Paris

Grave compactée végétalisée

Revêtement perméable, infiltrant et naturellement humide qui alimente les plantes contenues à la surface.

Composé (du sol à la surface) de 10 cm de paille non compactée, 35 cm de graves (cailloux ou béton recyclé), 20 cm de graves mélangées à un substrat naturel, 2 cm de substrat avec graines

d'herbacées.

Entretien très limité.

Convient aux PMR et aux camions de pompier (si épaisseurs plus importantes).



Grave compactée végétalisée © CAUE de Paris

Sols durs

Sols en agrégats liés

Parmi les matériaux cités ci-dessous, un retour d'expérience négatif a été constaté pour les matériaux drainants (le béton poreux, enrobé drainant) et le sol stabilisé. Nous déconseillons donc ces matériaux pour les cours d'école.



Béton désactivé © CAUE de Paris, Ville de Paris

Béton classique ou désactivé

Imperméable. Peut servir de surface de ruissellement, pour infiltration dans un espace vert à proximité.



Béton drainant © CAUE de Paris

Enrobé à liant organo-minéral ou végétal

Alternative aux enrobés classiques. Liants végétaux à partir de matières renouvelables et recyclables. Imperméable ou drainant, selon le type de liant utilisé.



Enrobé drainant © CAUE de Paris

Béton poreux et enrobé drainant

Des retours d'expérience négatifs ont mis en évidence les inconvénients de recourir au béton et enrobé drainant. Les cavités drainantes de ces matériaux se combrent avec le temps et diminuent fortement leur capacité drainante, demandant un entretien conséquent. Ce colmatage peut provoquer la glissance du sol, et la forte abrasivité du matériau provoque des blessures aux enfants qui chutent.



Sol stabilisé © CAUE de Paris, Laurent Bourgogne

Sol stabilisé

Ne convient pas à une zone de passage pour véhicules ou passage important d'élèves. Peu perméable, et sa perméabilité diminue avec le temps. Risque de flaques d'eau. Salissure de l'intérieur du bâtiment. Poussière par temps sec. Désherbage régulier et balayage des feuilles mortes.

Sols en modules assemblés (dalles, pavés)

Le joint : élément clé des sols modulaires.

Ils peuvent être perméables (terre, sable, ...) ou imperméables (résine époxy, bitume, mortier, ...). La perméabilité dépendra de la taille des joints. Il est possible d'avoir sur une même surface des joints différents pour permettre des usages différents.

Les dalles et pavés peuvent être en béton, béton drainant, en pierre.



Joints différents pour usage différent : enherbés à gauche et au mortier à droite © CAUE de Paris



Pavés enherbés © Ville de Paris



Exemple de dallage irrégulier (à gauche) et sur la promenade Levi-Strauss (à droite), à Paris © CAUE de Paris



Cour oasis à l'école Kuss © Ville de Paris



Ombre portée des arbres © CAUE de Paris



Pergola en bois avec ancrage au sol dans des fosses en pleine terre et plantes grimpantes © CAUE de Paris



Ombre portée des arbres © CAUE de Paris



Auvent végétalisé, école A la Croisée des Chemins, Bruxelles © Ville de Paris



Cour oasis Lycée Français d'Anvers © Ville de Paris



Robinetts extérieurs © Théo Menivard, CAUE de Paris



Voile rétractable © CAUE de Paris



Voile d'ombrage © CAUE de Paris

Concevoir une cour oasis

Une cour oasis est un îlot de fraîcheur : il combine l'ombre, le mobilier et l'eau. Une large place est dédiée aux revêtement de sol naturels perméables, qui sont ici compatibles avec l'usage (jeux).

SOLS PERMEABLES

Exemples de matériaux et entretien : voir pages suivantes

SOL NATURELS ET PERMÉABLES

À privilégier au maximum

Les sols naturels sont à privilégier (copeaux, pleine terre, graviers de noyaux, ...), ils sont adaptés à de multiples activités (courir, jardiner, jouer, ...) et sont utilisés pour leurs qualités sensorielles.

Leur entretien sera différent de celui des sols asphaltés ou bétonnés : il ne faudra pas balayer les feuilles mortes, mais il faudra le retourner régulièrement pour éviter l'humidité et l'exposer aux rayons UV qui détruiront les bactéries. Ces matériaux sont donc à placer dans des zones ensoleillées ou semi-ensoleillées. Il faudra également prévoir de le recharger régulièrement les matériaux qui seront désagregés ou éparpillés par les enfants.

SOLS DURS

Les sols durs sont adaptés pour des zones sans danger de chute libre. Ils permettent le passage de véhicules et permettent aussi de faire la transition entre les sols naturels, parfois salissants, et les sols intérieurs de l'écoles. On distingue les sols en agrégats liés et les sols en modules assemblés.

Sols en agrégats liés

Il existe des sols liés perméables, mais désormais les cours OASIS privilégient les matériaux non-infiltrants avec redirection des eaux pluviales vers les zones végétalisées. En effet, les sols perméables (béton poreux, ...) se colmatent au fil de temps, deviennent glissants et demandent beaucoup d'entretien pour une école.

Sols en modules assemblés (pavés, dallages, ...)

Les joints sont un élément clé des sols modulaires. Ils peuvent être perméables (terre, sable, ...) ou imperméables (résine époxy, bitume, mortier, ...). La perméabilité dépendra de la taille des joints. Il est possible d'avoir sur une même surface des joints différents pour permettre des usages différents.

OMBRE et VEGETATION

Ombre VEGETALE

(de préférence)

Arbres, arbustes, herbes hautes

Associer les 3 strates pour reconstituer un habitat naturel favorable à l'épanouissement de la biodiversité.

Plantation plus serrée en milieu scolaire

Pour faire face au piétinement, à l'arrachage ou à la difficulté de s'implanter : planter de manière plus serrée ; de 8 à 10 pieds par m² pour les vivaces couvre-sol, et 2 à 3 arbustes par m². Arbres : les grands sujets résisteront mieux.

Végétaliser les façades et les clôtures

Si l'espace en pleine terre pour les plantations est restreint, profiter des façades ou grillages pour y faire planter des plantes grimpantes, de pleine terre de préférence (facilité d'entretien).

Haie pour isoler la cour de l'extérieur

Pour le rôle de brise-vue et pour retenir la pollution. Haies libres à privilégier aux haies taillées (demandent moins d'entretien et plus ludiques pour les enfants).

Jardins et potagers pédagogiques

Prévoir un point d'eau à proximité pour l'arrosage, par exemple raccordé à une citerne d'eau de pluie.

Compostage

Composteurs placés dans un endroit facile d'accès, sur un sol perméable et dans un emplacement mi-ombre, mi-soleil. Ils doivent être équipés, au fond, d'une grille métallique pour empêcher les rongeurs de venir y nicher.

Gestion de l'eau pluviale

Infiltration d'eau de pluie sur site afin de maintenir une terre humide pour les végétaux. L'eau sera guidée par la topographie vers les massifs végétaux où elle sera infiltrée (noues, fossés humides, jardins de pluie, ...). Les rivières pédagogiques ont en général beaucoup de succès auprès des enfants.

Arrosage et entretien

En période scolaire, une équipe pédagogique peut prendre en charge l'arrosage et la taille des arbres. Lors des congés, cela peut être pris en charge par une association...

ACCESSIBILITÉ (SEMI-) PUBLIQUE?

Le fait de rendre accessibles les cours d'écoles en dehors des horaires scolaires est une solution au manque d'espaces verts dans les quartiers les plus vulnérables. Des initiatives sont déjà lancées dans de nombreuses villes (Genève, Paris, Barcelone, San Francisco, ...) où les cours sont rendues publiques ou semi-publiques (ouvert à des associations) à certains horaires.

Quels critères? Les éléments les plus importants sont l'ombre (qui peut être

apportée par les arbres, mais aussi les bâtiments, un voile...), la végétation (même s'il s'agit d'installations temporaires), le rafraîchissement par l'eau (robinet, possibilité de brancher un tuyau d'arrosage), l'accès à des sanitaires (au sein du bâtiment, ou installations temporaires), et du mobilier adapté (permanent ou temporaire). Le recours à des installations temporaires permet de répondre au besoin d'espace de manière urgente.

A anticiper dans le cas de la construction d'une nouvelle école ou

d'une rénovation importante : la question de la gestion d'accès et de l'ouverture sur le quartier sera anticipée lors de l'élaboration de projets neufs ou de rénovation importante, surtout si l'école se situe en zone de carence en espaces verts.

EAU

Les dispositifs high-tech (brumisateurs manœuvrés via une application, ...) sont plutôt déconseillés ici pour des questions de coûts et de maintenance.

Robinet à bouton poussoir

Prévoir une capacité de branchement pour un tuyau d'arrosage classique ou ludique pour l'été. Le surplus de l'eau doit être redirigé vers des espaces plantés ou une rivière pédagogique.

Jeux d'eau mobiles

L'idéal est de prévoir des installations provisoires amovibles à brancher sur un robinet extérieur. Des

arroseurs oscillants de surface, prévues pour les pelouses, pourront être installés lors de fortes chaleurs pour rafraîchir les enfants et le sol. Simples d'usage, ils sont très peu encombrants et ne demandent aucun entretien particulier.



Jeux d'eau mobiles © Elena Rabinka

MOBILIER

Quelques exemples d'espaces ludiques et sportifs sont illustrés dans les pages suivantes. On rappellera qu'il est important de proscrire les matériaux tels que les métaux dans

les espaces très ensoleillés pour prévenir les risques de brûlures.

Voir également « îlot de fraîcheur » page 138.

Bâtiment

L'ICU est provoqué en grande partie par les matériaux urbains. Ces matériaux sont lourds, ils accumulent donc beaucoup d'énergie lorsqu'ils sont ensoleillés la journée, se comportant comme de véritables réservoirs de chaleur, pour la restituer lentement le soir et la nuit. Les mesures d'atténuation s'appliquant aux bâtiments consistent à faire de l'ombre pour éviter les rayons solaires (façade végétale, protections solaires), ou à diminuer la quantité de chaleur emmagasinée en journée (couleur claire, recours à un matériau léger comme un isolant qui n'emmagasinera pas de chaleur).

A l'échelle du bâtiment, nous pouvons envisager le problème sous deux points de vue :

- **quel est l'effet d'un bâtiment sur l'ICU à l'échelle de son quartier,**
- **et comment protéger le bâtiment de la surchauffe (confort à l'intérieur du bâtiment).**

(Notons que ce second point, très vaste, dépasse le cadre de cette étude

mais sera quand même brièvement discuté ici.)

Ces mesures sont par contre bien effectives pour améliorer le confort intérieur du bâtiment et le protéger contre la surchauffe estivale. Cela est résumé dans le tableau ci-dessous.

	Confort intérieur	Impact ICU (à l'échelle du quartier)
Façade isolée	+(*)	+
Façade blanche	++	+
Façade verte	++	+
Toiture isolée	++	+
Toiture blanche	++	+
Toiture verte	++	+
Protections solaires extérieures aux fenêtres	++++	0

(*) attention, le fait d'isoler un bâtiment modifie son équilibre thermique au fil des saisons. En hiver, le soleil est capté par les fenêtres et réchauffe le bâtiment, et cette chaleur est piégée à l'intérieur grâce à l'isolation thermique : c'est l'effet de serre, qui contribue à diminuer la consommation de chauffage . En mi-saison et en été, cet effet de serre est toujours à l'œuvre : le

soleil est capté à l'intérieur, mais la chaleur ne peut s'évacuer le soir ni la nuit par les murs isolés ; il en résulte un surchauffe estivale, qui est malheureusement un phénomène que l'on rencontre parfois dans les bâtiments passifs qui ne sont pas équipés de protections solaires. Il est donc important de **prévoir des protections solaires efficaces lorsque l'on isole un**

bâtiment. Pour être efficaces, celles-ci doivent être positionnées du côté **extérieur** de la fenêtre.

BÂTIMENT NEUF OU RÉNOVATION

Les quelques principes suivants permettront d'atténuer l'ICU et augmenter le confort intérieur lors de la construction ou la rénovation d'un bâtiment.

Façade ensoleillée :

- Protéger les fenêtres par des protections solaires extérieures, y compris les balcons ;
- Ombrager les façades, par des plantes grimpantes ou autre ;
- Eviter les façades 100% vitrées

(l'idéal se situe entre 40 et 60% de façade vitrée) ;

- Isolation par l'extérieur de type enduit sur isolant (matériau léger n'accumulant pas de chaleur)
- Proscrire les revêtements extérieurs métalliques ;
- Attention au pied de façade ensoleillé qui engendre un piège radiatif (voir page 122-123).

Façade non ensoleillée : pas de prescriptions particulières.

Toitures :

- Toitures à isoler
- Toitures vertes de préférence, sinon toitures blanches

On prendra soin de disposer les rejets de chaleur issues de la **climatisation** en toiture plutôt qu'en pied de façade.



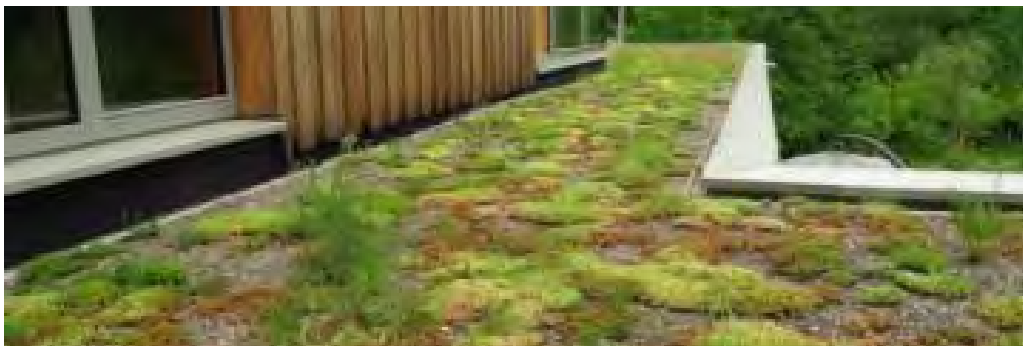
Façade avec paroi végétale sur un support séparé du mur (façade verte apposée ou séparée), Bâtiment exemplaire Caméléon © Yvan Glavie



Toiture repeinte en blanc © Lakeview_Images - getty images



Protection solaires de la façade par une façade verte avec paroi végétale séparée. A gauche : Ch de Neestalle, Forest (Source : Yvan Glavie). A droite : Bât Alpine Finanz, Suisse (source : Jakob).



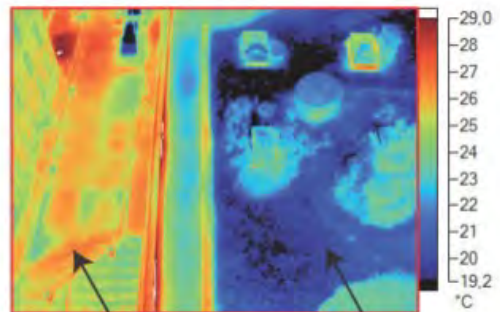
Toiture verte



Façade végétale (Carl Stahl Architektur)



Protections solaires verticales et auvent de toiture © LEU Réunion



En contre-bas l'espace public minéralisé encore chaud

Au premier plan : vue plongeante sur une terrasse végétale qui crée localement un îlot de fraîcheur (2 août 2011 vers 23h (21h UTC))

Effet microclimatique d'une toiture végétale (APUR)



Protections solaires en lamelles horizontales (www.renson.eu)



Brise-soleil orientable (<https://archzine.fr/>)



Stores banne (<https://www.passion-store.fr/>)



Brise-soleil en bois protégeant la façade et les fenêtres (<https://archzine.fr/>)

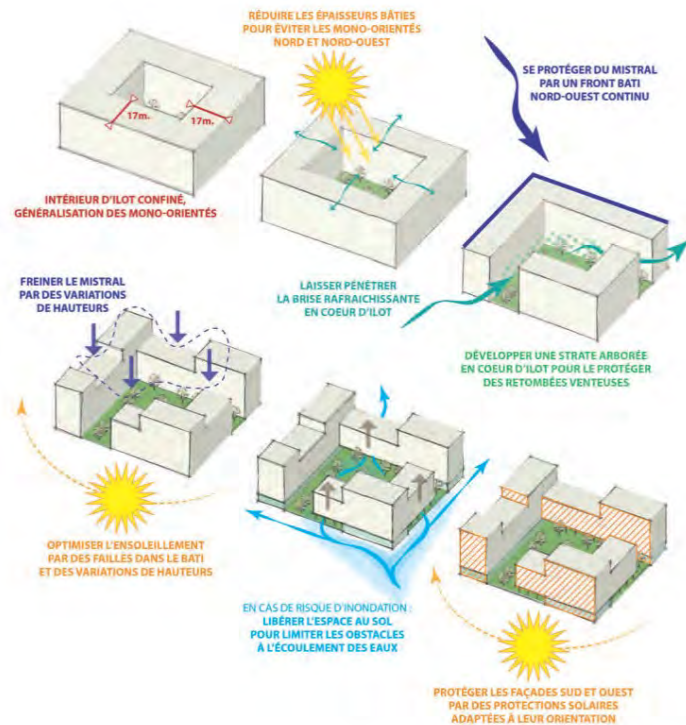
Quartier neuf

L'avantage d'un quartier neuf est que le degré de liberté est total et permet de concevoir le quartier en prenant en compte le phénomène d'ICU dès l'esquisse. Les principes à prendre en compte ont déjà été abordés dans les précédents chapitres, c'est pourquoi on reprend ici les éléments clés sous la forme condensée d'une checklist clé-en-mains qui guidera le concepteur.

Morphologie urbaine

Eléments importants :

- Forme bio-climatique, voir schéma ci-dessous (aussi page 110)
- Ville poreuse, qui laisse passer le vent (page 112)
- Effet canyon : préconiser les rapports H/W ≤ 1 (éviter les rues hautes et étroites) (page 118)
- Prendre en compte la topographie pour favoriser les brises thermiques (pages 106 à 109)
- Minimiser l'empreinte des bâtiments au sol pour maximiser les espaces verts et l'infiltration de l'eau de pluie



Travail sur le gabarit des bâtiments pour rendre le quartier bioclimatique. Remarque : cet exemple est propre au territoire de Marseille, où la formule urbaine est orientée de manière à se protéger du Mistral venant du nord-ouest. Cette méthodologie est cependant transposable à Bruxelles où les vents dominants sont orientés SSO.

Espaces verts

Eléments importants :

- Créer des îlots de fraîcheur (page 138)
- Plantation d'arbres : chapitre 3, voir résumé page 84 (également ci-dessous)
- Végétation : varier les hauteurs, laisser des espaces libres pour favoriser l'engouffrement du vent (pages 109 et 120)
- Si zone en carence en espaces verts : anticiper la mutualisation des espaces, l'ouverture sur le quartier (gestion d'accès, ...) (cour d'école : page 166)
- Impétrants à rassembler dans une tranchée, une gaine technique commune, ... (page 78)

Communication

Les choix sont à discuter en concertation : concepteurs, responsable urbanisme, gestionnaires de réseaux, ingénieur de voirie, spécialiste de l'arbre.

Sol

Mise en place d'un sol de qualité (décompacté, ...) dans la région de développement racinaire

Eau

Eléments importants :

- Gestion intégrée des eaux pluviales
- Prévoir des réservoirs d'eau pluviale pour arroser les espaces verts en cas de sécheresse, éventuellement un réseau d'eau non potable à l'échelle du quartier
- Rafraîchissement par l'eau : fontaines, jeux d'eau, robinets extérieurs, ...

Strates de végétations

+ Buissons, herbes hautes

Choix essence

En fonction de : taille couronne, résistance à la sécheresse, transparence canopée, compatibilité avec type de sol en place, ... privilégier la diversité d'essences pour + de résilience.

Impétrants

Définir une zone pour impétrants à protéger des racines (géotextile, ...). Si possible : dévoisement + regrouper dans une tranchée commune, voire galerie multi-réseaux (travaux + importants).

Eau

Mise en place stratégie récupération eaux pluviales (non polluée, favoriser l'infiltration), et/ou arrosage en cas de sécheresse

Trame brune

Connecter les fosses entre elles si plusieurs plantations

ABRES

Dalle

Éléments importants :

- Si zone de carence en espaces verts : dimensionner la dalle pour qu'elle puisse accueillir des arbres (substrat de min 1,5m de profondeur...) (pages 142, 144)
- Pas d'infiltration d'eau pluviale possible à cause de la dalle ; penser à un arrosage automatique économe en eau. Privilégier des végétaux résistants à la sécheresse.

Etude d'ensoleillement

Une étude d'ensoleillement pourra identifier les façades des bâtiments à protéger (protections solaires *extérieures* aux fenêtres, protéger la façade, ...), guider le choix des revêtements de sol (page 100), identifier les besoins en ombre et l'implantation d'îlots de fraîcheur et d'arbres.

Revêtements de sol

Éléments importants :

- Le revêtement de sol sera perméable sur la plus grande surface possible. Attention aux matériaux de sol en agrégats liés perméables (béton poreux, ...) : les pores se colmatent avec le temps, et ce type de revêtement demande un entretien important. Privilégier les sols en modules assemblés (pavés, dallages, ...) avec joints perméables, ou tout simplement une surface imperméable avec infiltration dans un espace vert à proximité directe.
- Stratégie fonction de l'ensoleillement (page 100) : matériaux lourds pour zone ombragée, matériaux léger (bois) pour zone ensoleillée lorsque cela est possible.

Bâtiments

Façade ensoleillée :

- Protéger les fenêtres par des protections solaires extérieures, y compris les balcons ;
- Ombrager les façades, par des plantes grimpantes ou autre ;
- Éviter les façades 100% vitrées (l'idéal se situe entre 40 et 60% de façade vitrée) ;
- Isolation par l'extérieur de type enduit sur isolant (matériau léger n'accumulant pas de chaleur)
- Proscrire les revêtements extérieurs métalliques ;
- Attention au pied de façade ensoleillé qui engendre un piège radiatif (voir page 122).

Façade non ensoleillée : pas de prescriptions particulières.

Toitures :

- Toitures à isoler
- Toitures vertes de préférence, sinon toitures blanches

On prendra soin de disposer les rejets de chaleur issus de la **climatisation** en toiture plutôt qu'en pied de façade.

7

Conclusion

Une étude sur l'ICU

Le changement climatique provoquera des vagues de chaleur de plus en plus nombreuses et intenses au cours des décennies à venir. Les habitants des villes sont particulièrement **vulnérables** face à ce phénomène.

La première cause de leur vulnérabilité tient à l'**effet d'îlot de chaleur** qui affecte le milieu urbain. Cet effet se manifeste par des températures plus élevées en ville qu'en milieu rural, à cause notamment des matériaux urbains, qui accumulent la chaleur la journée et la restituent la nuit. L'effet d'îlot de chaleur est un phénomène qui se manifeste le soir et la nuit (en journée, la température de l'air est sensiblement identique en ville et à la campagne).

Ensuite, la particularité des citadins des grandes villes est leur relative **incapacité à s'adapter** à de fortes chaleurs. En effet, en milieu rural, la typologie du bâti est telle que les habitants ont accès à des espaces verts à proximité, à un jardin ou une cour où ils peuvent éventuellement mettre une piscine, et de manière générale, à des lieux extérieurs pour se rafraîchir. Les citadins des grandes villes n'ont souvent pas cette possibilité, ce qui les rend beaucoup plus vulnérables aux vagues de chaleur. L'(in)capacité d'adaptation est la deuxième cause de vulnérabilité.

Lors de cette étude, une **carte de vulnérabilité** a été produite en croisant des données démographiques et une carte satellite représentant le stress thermique. Sur base de cette carte, 10 sites pilotes ont été sélectionnés, pour lesquels une analyse approfondie a été menée : une campagne expérimentale de mesure de la température de l'air (**mesure de l'ICU**) ainsi que des enquêtes publiques et entretiens avec les usagers pour discuter des stratégies d'adaptations qu'ils avaient, ou n'avaient pas, pour faire face au stress thermique (dialogues sur la **capacité d'adaptation**). Ensuite, des mesures d'atténuation ont été proposées pour les 10 sites pilotes, avec évaluation de leur efficacité par simulation numérique, l'efficacité étant définie comme la réduction de la température ressentie au moment le plus chaud d'une journée caniculaire, donc plutôt focalisé sur le confort diurne.

Ces analyses ont été présentées lors de 6 réunions avec les différents services de la Ville de Bruxelles. Les discussions ont permis d'évaluer les mesures proposées pour chaque site pilote, et de préciser les attentes sur le contenu et la forme de ce dernier livrable.

Ce document est plus qu'une simple **liste de mesures** visant à atténuer l'effet d'îlot de chaleur. Il vise également à **vulgariser** les phénomènes physiques prenant place en milieu urbain afin de mieux comprendre l'effet des mesures proposées. Il se veut proche du terrain : des **solutions pratiques** sont proposées pour répondre aux questions techniques soulevées lors des réunions. De nombreux **outils (arbres de décision, mind maps, checklists)** sont proposés pour faciliter les choix lors de la conception d'espaces urbains. Enfin, des **exemples concrets** sont présentés à la fin de chaque chapitre afin d'illustrer les bonnes pratiques, de montrer certaines démarches innovantes dans d'autres villes, et de servir d'inspiration pour d'autres projets.

L'ICU est un sujet vaste qui touche à de nombreux domaines. Le phénomène physique sous-jacent est complexe, et les solutions pour y remédier sont multiples et, nous l'avons vu, leur efficacité est difficile à quantifier de manière univoque et objective.

Défis pour l'avenir

Nous vivons une période de transition. Face au changement climatique, la clé est l'adaptation. La ville se veut plus perméable, plus verte, plus humaine ; il faudra cependant relever certains défis pour atteindre cet idéal. Ces défis sont parfois d'ordre très pratique.

Planter un arbre en ville

Réconcilier racines et réseaux enterrés

Il est certain que la plantation d'arbres est une réponse utile et nécessaire. Cela n'en représente pas moins un défi d'ordre technique, car la cohabitation des racines et du sous-sol urbain est souvent complexe. Des pistes de solutions ont été avancées dans cette étude, et cette question fait actuellement l'objet de recherche et de concertation au sein de Bruxelles Environnement. Il sera nécessaire de créer un dialogue entre tous les services concernés, et ce, dès l'esquisse d'un projet : l'équipe de conception, le département d'urbanisme, mais aussi les gestionnaires de réseaux et spécialistes de l'arbre.

Face à l'inconnue : l'adaptation

L'inconnue du sous-sol lors de la conception d'un projet est également un défi : lors du terrassement, on peut tomber sur des imprévus tels des fondations ou autres obstacles non répertoriés dans les plans, ce qui peut remettre en question le

projet initial. Il est nécessaire de prendre en compte cette incertitude dans la méthodologie de gestion de projet, par exemple en intégrant une certaine flexibilité au cours de la conception et de la réalisation.

Nouvelles essences

Nous vivons une période de transition où la ville se végétalise, tout en étant sous la menace d'épisodes de sécheresse de plus en plus intenses. Il convient de planter de nouvelles essences résistantes au climat futur, ainsi qu'introduire une certaine mixité entre les espèces choisies, afin de rendre le capital végétal plus résilient, mais aussi à titre d'expérimentation afin d'observer quelles essences sont mieux adaptées à tel ou tel milieu.

Stratégie d'eau pluviale et arrosage

La stratégie de gestion durable des eaux pluviales devient plus importante que jamais... mais ne suffira malheureusement pas. Il faut anticiper et budgétiser dès aujourd'hui l'arrosage des espaces verts en période de sécheresse. Un arbre mal arrosé est un arbre vulnérable, cassant et dangereux. Certaines villes misent sur un réseau d'eau non potable, d'autres installent des réservoirs sous les voiries, d'autres encore collaborent avec les pompiers pour assurer les besoins en eau des végétaux en cas de sécheresse. Bruxelles devra elle aussi développer sa stratégie. Le recours à des essences peu gourmandes en eau diminuera le besoin en eau lors d'événements de sécheresse.

Désimperméabilisation des sols

Si les arbres se comportent en véritables climatiseurs, ils ne peuvent pas être plantés partout. Une alternative très efficace pour lutter contre l'ICU et accroître le confort thermique est la désimperméabilisation des sols. En effet, un sol humide est capable de « transpirer », et par ce phénomène, de réduire sa température de surface, et par conséquent réduire le stress thermique au niveau du piéton et également atténuer l'ICU.

Notons par ailleurs que la désimperméabilisation des sols contribue également à réduire les risques d'inondations, autre grande vulnérabilité de la Ville de Bruxelles.

Îlots de fraîcheur

Les îlots de fraîcheur sont des lieux qui permettent de se reposer, se rencontrer, tout en se rafraîchissant lors d'une journée chaude. Ils permettent de réduire la vulnérabilité des citadins face aux vagues de chaleur en leur procurant un lieu de rafraîchissement (capacité d'adaptation). Dans un quartier très dense où le manque d'espaces verts est criant, il est important de pouvoir tirer parti de chaque espace et chaque sur-largeur, même de taille réduite, afin d'y instaurer un lieu propice au rafraîchissement. La mutualisation d'espaces (cours d'école, ...) est également un moyen d'augmenter les possibilités d'espaces extérieurs. Le rafraîchissement passe par l'ombre, apportée si possible par la végétation, mais aussi par la présence de l'eau, sous forme de fontaine, jeux d'eau...

Confort intérieur

Il convient également de fournir des espaces intérieurs protégés de la surchauffe estivale. Il est nécessaire de prévoir pour cela des protections solaires *extérieures* (les stores intérieurs sont inefficaces), voire des espaces climatisés pour les personnes plus fragiles, comme les personnes âgées ou les jeunes enfants (crèches, ...). Des bâtiments publics climatisés peuvent également servir de refuge en journée, comme les bibliothèques par exemple.

Le changement climatique mettra les citadins à rude épreuve lors des futures vagues de chaleur. Il convient de leur fournir un milieu de vie adéquat, où ils peuvent trouver refuge pour se rafraîchir, se rencontrer, se reposer.

Quelques réalisations exemplaires à Bruxelles

Parckdesign

Derrière Tour et Taxi, une vallée artificielle généreusement plantée est devenue un vrai îlot de fraîcheur en ville.



www.parckfarm.be

Gare maritime

Projet exemplaire par la réduction des émissions (utilisation des énergies renouvelables), créations d'ombre et ventilation intérieure et végétalisation de l'espace intérieur, réutilisation de l'eau de pluie.



<https://tour-taxi.com/>
Bureau Bouwtechniek, Neutelings Riedijk Architects

Grande Halle

Quai de l'Industrie, 79, 1080 Molenbeek-Saint-Jean. Espace public couvert et légèrement végétalisé, mais l'effet combiné de l'ombre et de la brise créent une situation accueillante durant des périodes de canicule



© Gautier Houba, L'Escaut & Zampone Architecture

Parc Simone de Beauvoir

Une large pelouse centrale accessible est délimitée par une épaisseur végétale au sud alors que les jardins potagers, terrasses de café et programmes sportif animent la limite nord du parc. Temporisation des eaux de pluies intégrée aux aménagements paysagers.

www.b612associates.com



Rue de Ransbeek, 16

Projet en cours d'étude. Ilot ouvert sur le quartier, espaces publics généreux et végétalisés mis à disposition des visiteurs et des habitants du quartier. Noue naturelle pour infiltrer l'eau sur site.



www.b612associates.com

Ecole A la Croisée des Chemins

Solutions rafraîchissantes dans la cour comme dans le bâtiment. L'action conjointe de la végétalisation, de la présence d'eau, des protections solaires et de la géothermie permet d'améliorer le confort des usagers.



<https://b2ai.com/>

Square des Archiducs

Les bâtiments s'inscrivent dans un grand jardin public qui évoque les cités jardins avoisinantes du Floréal et du Logis: chemins, zones de recul, cerisiers, potagers.



www.pblondel.be

8

Bibliographie

Bibliographie

- ADEME, *Des solutions pour rafraîchir les villes. S'inspirer d'expériences dans le monde selon la variabilité des climats d'aujourd'hui et de demain.*
- ADEME, *Adapter son logement aux fortes chaleurs.*
- ADEME, *L'arbre en milieu urbain, acteur du climat en région Hauts-de-France.*
- ADEME, *Plus fraîche ma ville.* [https :// plusfraichemaville.fr/](https://plusfraichemaville.fr/)
- Agence Parisienne du Climat, *Adaptaville, des solutions pour s'adapter au changement climatique.* [https :// www.adaptaville.fr](https://www.adaptaville.fr)
- APUR, *Espaces publics à végétaliser.*
- APUR, *Carte des arbres d'alignement à Paris.*
- APUR, *La canopée des arbres plantés sur les espaces publics parisiens. Etude comparative de 8 essences principales.*
- APUR, *Parcours îlots de fraîcheur.*
- APUR, *Les îlots de chaleur urbains à Paris - Cahier n°1 : facteurs et mesures d'adaptation.*
- APUR, *Les îlots de chaleur urbains à Paris - Cahier n°2 : simulation de 3 formes urbaines et enseignements.*
- APUR, *Les îlots de chaleur urbains à Paris - Cahier n°3 : brises thermiques.*
- APUR, *Les îlots de chaleur urbains à Paris - Cahier n°4 : revêtement de sol.*
- APUR, *Les îlots de chaleur urbains à Paris - Cahier n°5 : outils de conception de projets.*
- A'URBA, *De l'îlot de chaleur urbain à l'îlot de fraîcheur. Mécanismes en jeu et principes pour des aménagements plus résilients. Synthèse.*
- A'URBA, *Guide technique, cahier 8. Matériaux.*
- Biodiversité positive, *Guide BBP, Fiches techniques. Allées, parkings : revêtements à biodiversité positive.*
- Biodiversité positive, *Guide BBP, Fiches techniques. Murs et pieds de murs à biodiversité positive.*
- Bruxelles Environnement, *Cycle « Ville animale », Séminaire 2, La faune dans le bâti*, 30 mai 2022.
- Builswise, *La sécurité incendie : un frein au développement des façades végétalisées?*, CSTC-Contact 2021/3.
- CAUE et Ville de Paris, *Cours oasis, cahier des recommandations pour la transformation des cours d'écoles.* 2022.
- CAUE, *Catalogue des végétaux des cours oasis.*
- CAUE, *Observatoire des cours Oasis*, [https ://www.observatoire-oasis.fr/](https://www.observatoire-oasis.fr/)
- Cerema Est, *SESAME, Services écosystémiques rendus par les arbres, modulés selon l'essence.* 2019.
- Cerema Est, *SESAME, 85 fiches espèces.*
- Curieuzenair, *Data collection, data analysis and results.* 2022. F. Lauriks, D. Jacobs and F. J. R. Meysman (2022) "CurieuzenAir : Data collection, data analysis and results". 50 p. University of Antwerp.
- Gouedard Q., *Les sols urbains, des milieux contraignants pour le développement de l'arbre dans la ville.* Mémoire de fin d'études. 2014.
- Lenzholzer, S. *Het weer in de stad : Hoe ontwerp het stadsklimaat bepaalt.* Nai010. 2013.
- Nature Quebec, *Milieux de vie en santé, Guide de plantation d'arbres en milieu urbain.* 2021.
- Plantes et Cité. *Revêtements perméables des aménagements urbains : typologie et caractéristiques techniques.* 2021.
- Trees and Design Action Group, *Arbre en milieu urbain. Guide de mise en œuvre.* 2016.
- Trees and Design Action Group, *Using rainwater for tree-based cooling on Garibaldi Street*, Lyon, France. 2018.
- Trees and Design Action Group, Ferranti, E.J.S., MacKenzie, A.R., Levine, J.G., Ashworth K., and Hewitt C.N. 2019. *First Steps in Urban Air Quality. Second Edition. A Trees and Design Action Group (TDAG) Guidance Document.* UK : London. Available from : [http :// epapers.bham.ac.uk/3069/](http://epapers.bham.ac.uk/3069/) Trees and Design Action Group : www.tdag.org.uk
- Ville de Montpellier, *Fiche - La plantation de l'arbre en phase travaux. Fosse de plantation continue.*
- Ville de Montpellier, *Fiche - La plantation de l'arbre en phase travaux. Fosse de plantation individuelle.*

