



IMPACTS DU VÉGÉTAL EN VILLE

FICHES DE SYNTHÈSE



Programme de recherche VegDUD - Rôle du végétal dans le développement urbain durable

AUTEURS : Guillaume Pommier, Damien Provendier, Caroline Gutleben, Marjorie Musy

Titre	Impact du végétal en ville
Correspondant Plante & Cité	Caroline Gutleben, Damien Provendier
Auteurs	Guillaume Pommier, Caroline Gutleben, Damien Provendier, Marjorie Musy
Relecteurs	Conseil scientifique de Plante & Cité : Frédéric Segur et Thierry Améglio
Résumé	<p>Ce document présente les impacts de la végétation sur plusieurs systèmes urbains en interaction : le climat, les ambiances, l'énergie, l'hydrologie, à différentes échelles spatiales mais aussi temporelles.</p> <p>Il a été réalisé dans le cadre du projet VegDUD. Ce projet associe des équipes des domaines des sciences de l'ingénieur, des sciences de l'environnement, des sciences de l'homme et de la société, des sciences de l'information et de la communication et des sciences du vivant.</p> <p>Ce document est destiné aux opérationnels (Élus/Décideurs, Gestionnaires, Aménageurs, Concepteurs) et s'appuie sur les résultats du projet VegDUD.</p>
Thématiques	Végétal - Paysage - Urbanisme: approches intégrées
Mots clés	Climatologie urbaine, Ilot de chaleur urbain, Consommation d'énergie, Confort thermique, Acoustique
Partenaires	IRSTV (Cerma/Ensa Nantes, LHEEA/ECN, ESO/université de Nantes), Ifsttar, Plante & Cité, LaSie (université de La Rochelle), LPGN (université de Nantes), Game (CNRM), Dota (Onera), IRSN, CSTB, Ephyse (Inra de Bordeaux). Le projet a également reçu le soutien de la Ville de Nantes et de Nantes Métropole. Il a été labellisé par les pôles de compétitivité PGCE et Végépolys.
Financements	ANR Villes durables 2009 (ANR-09-VILL-0007)
Date de publication	Avril 2014

Remerciements :

Merci à Thierry Améglio (INRA) et Frédéric Segur (Grand Lyon) du conseil scientifique de Plante&Cité pour leurs relectures.
 Merci aux contributeurs et référents de tâches VegDUD qui ont participé d'une manière ou d'une autre au travail de constitution de la connaissance :

Agota Szucs (IRSTV/Cerma), Benjamin Morille (IRSTV/Cerma), Laurent Malys (IRSTV/Cerma), Isabelle Calmet (Université de Nantes), Richard Tavares (Université de Nantes), Fabrice Rodriguez (Ifsttar), Benoît Gauvreau (LCPC), Gwenael Guillaume (Ifsttar), Rabah Djedjig (LaSie), Emmanuel Bozonnet (LEPTIAB, Université de La Rochelle), Katia Chancibault (Ifsttar), Cecile Demunck (Game/CNRM), Aude Lemonsu (Game/CNRM), Patrice Mestayer (IRSTV), Herve Andrieu (Ifsttar), cinarduniv-lr.fr, Nathalie Long (LaSie), Maeva Sabre (CSTB), Yves Brunet (ephyse), Jérôme Vinet (CSTB), Sylvain Dupont (ephyse), Jean-Pierre Lagouarde (ephyse).

Merci à Virginie Anquetil pour son travail au sein de Plante & Cité sur le volet typologie et à Vincent Bouvier (Agrocampus Ouest) pour ses retours.

Merci aux membres de l'ADIVET pour leurs relectures des fiches techniques toitures et façades végétalisées.

Enfin un grand merci à toute l'équipe de Plante & Cité pour les relectures et échanges lors de la finalisation de ces fiches techniques.

Graphisme - illustrations des figures : Marguerite Aimé-Sintès.

Page de couverture Quai de l'Erdre, Nantes 2009. © Plante&Cité.



SOMMAIRE

Introduction	4
ENJEUX & MÉTHODES	5
Enjeux des services écosystémiques	6
Une typologie du végétal urbain	7
Apport de la télédétection et connaissance du patrimoine végétal	8
Expérimentation et mesures du climat urbain	9
Modélisation des impacts du végétal en ville	10
LES 4 FICHES TECHNIQUES VEGDUD	11
▶ Fiche 1 : Techniques alternatives de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal	12
Gestion des eaux pluviales : les techniques alternatives	13
Cadre réglementaire de la gestion des eaux pluviales	14
Eaux pluviales et pollution	15
Gestion des eaux pluviales, cycle de l'eau, climatologie	16
▶ Fiche 2 : Façades et toitures végétalisées	20
Toitures végétalisées	21
Façades végétalisées	22
Cadre réglementaire des façades et toitures végétalisées	23
Évaluations des impacts	24
▶ Fiche 3 : Arbres	32
Les arbres en ville	33
Cadre réglementaire et promotion de l'arbre urbain	34
Évaluation des impacts	35
▶ Fiche 4 : Surfaces enherbées /surfaces sans couvert végétal	40
Typologie des surfaces enherbées	41
Gestion	42
Évaluation des impacts	43
Conclusion et perspectives	48
DES CLÉS POUR COMPRENDRE : NOTIONS PHYSIQUES ET ENJEUX DE VEGDUD	49
Bilan énergétique du bâtiment	50
Consommation d'énergie et confort intérieur	52
Bilan hydrologique	53
Bilan énergétique d'une surface	54
Ilot de chaleur urbain	55
Piège radiatif : exemple de la rue canyon	56
Confort thermique extérieur	57
Microclimat urbain et type de quartier	58
Acoustique	59
PRINCIPALES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES PAR CHAPITRE PAR THÈMES	61

INTRODUCTION

Le projet VegDUD « Rôle du végétal dans le développement urbain durable, une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances », a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre de l'Appel à Projets « Villes Durables » 2009. Ce programme de recherche qui réunit plusieurs dizaines de chercheurs durant 4 années, a engendré la production de publications scientifiques, d'un ouvrage collectif intitulé « Une ville verte, Les rôles du végétal en ville » (édition Q, 2014) et de la présente synthèse.

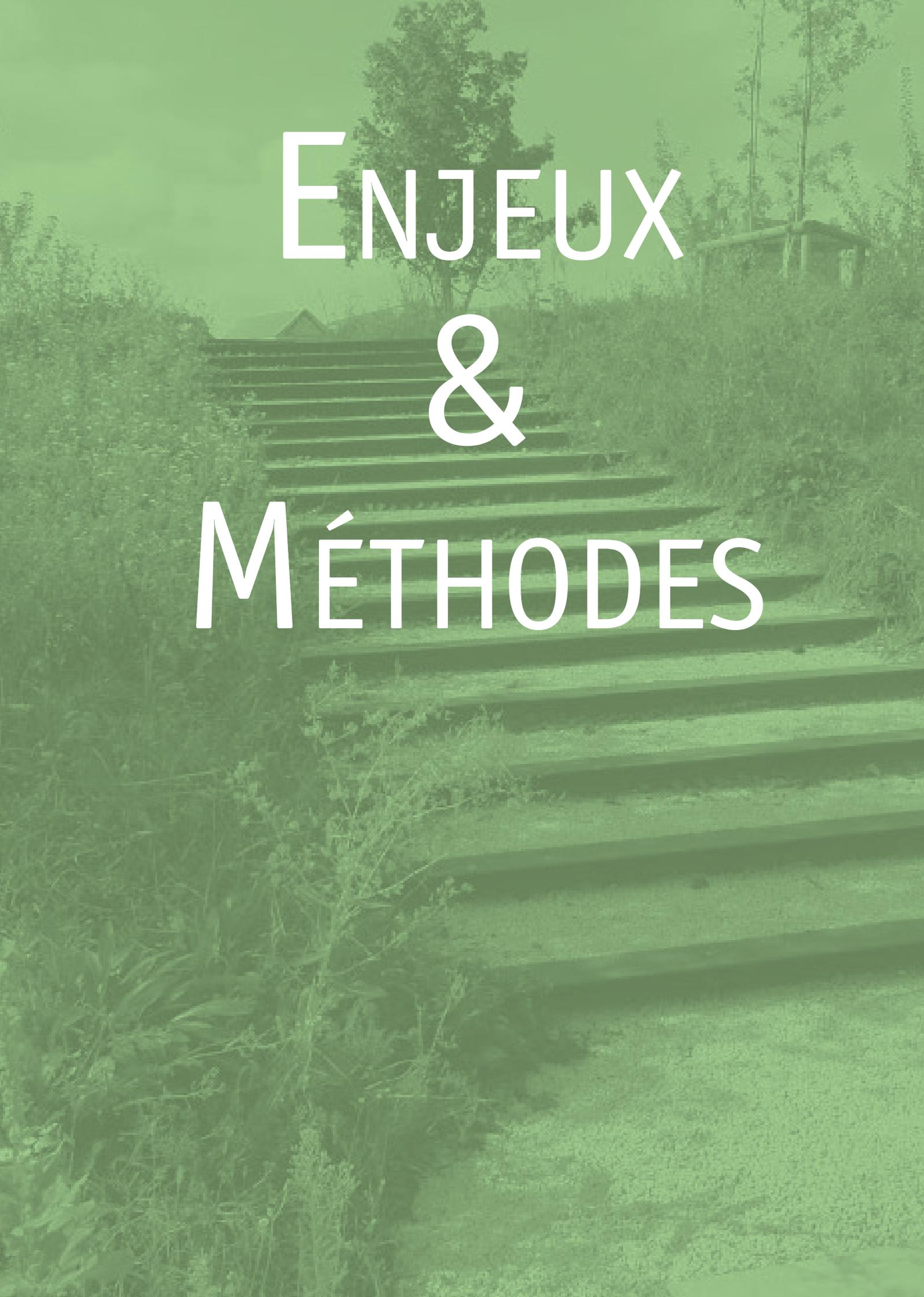
Plante & Cité a piloté la rédaction de cette synthèse présentée sous forme de fiches sur l'impact du végétal. L'objectif de ces fiches est de valoriser les principaux résultats de VegDUD. Elles s'adressent à différents publics professionnels (urbanistes, architectes, paysagistes, gestionnaires, décideurs) non spécialistes qui ont besoin d'éléments concrets pour argumenter et concevoir des innovations végétales en matière de forme et d'usage pour la ville durable de demain.

Cette synthèse se présente en plusieurs parties. Tout d'abord, une présentation du contexte, des objectifs et des méthodes associées au projet VegDUD, ensuite les clés pour comprendre les notions physiques et enjeux étudiés par les chercheurs et enfin, les résultats sur les impacts du végétal à différentes échelles sous forme de fiches.

Ces fiches techniques sont organisées par dispositifs de végétation étudiés. Ces dispositifs végétaux ont été choisis comme

objets d'étude communs dans une première étape de partage d'une typologie de la végétation urbaine. Elles traitent des toitures et façades végétalisées, des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal, des surfaces enherbées et des arbres. Ces fiches peuvent être lues indépendamment et résument les impacts des dispositifs étudiés. Elles sont focalisées sur les thèmes développés dans le projet : climat, hydrologie, consommation d'énergie, confort thermique et acoustique. Elles sont illustrées par des résultats issus des travaux du programme de recherche VegDUD.

L'étude du rôle du végétal sur les enjeux climatique, thermique, et hydrologique reste une discipline récente. Cette synthèse pluridisciplinaire cherche à apporter des notions clés sur le rôle du végétal et à donner des résultats contextualisés. Ils sont donc difficilement généralisables du fait de la variabilité de certains facteurs déterminants plus ou moins bien connus. Le terme végétal, par exemple, intègre une grande diversité d'espèces ayant potentiellement des propriétés physiques et physiologiques différentes : résistance à la sécheresse et évapotranspiration, couleur et albédo, densité et persistance du feuillage etc. Les conditions climatiques locales (soleil, vent, hydrologie) varient fortement en milieu urbain et la gestion joue également un rôle majeur complexe à modéliser et à estimer (arrosage, tonte, taille des arbres). Ces limites doivent être à l'esprit au cours de la lecture de cette synthèse.

A green-tinted photograph of a hillside with terraced steps and a house in the background. The text 'ENJEUX & MÉTHODES' is overlaid in white.

ENJEUX & MÉTHODES

ENJEUX DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les grandes agglomérations françaises doivent faire face à des objectifs environnementaux forts qui peuvent s'avérer contradictoires, comme se densifier pour maîtriser l'étalement urbain, maintenir la biodiversité, anticiper et limiter le changement climatique, réduire les émissions de gaz à effet de serre, offrir un cadre de vie sain et agréable aux habitants.

Ces enjeux doivent être pris en compte à toutes les échelles spatiales d'intervention urbaine, de celle de l'aménagement d'un lieu de vie à celle de la ville, et avec un suivi dans le temps. Ils se traduisent dans la pratique des projets, par des interrogations récurrentes sur les rôles relatifs de la forme urbaine et du végétal.

Pour améliorer le confort estival dans les villes, une des solutions avancées est l'accroissement de la place de la végétation. Simultanément, pour aider à maîtriser la dépense énergétique induite par la climatisation et le chauffage des bâtiments, qui entraînent l'émission de gaz à effet de serre et des charges anthropiques participant à l'îlot de chaleur urbain, les solutions végétales appliquées aux enveloppes de bâtiments ou à l'espace urbain, sont également réputées efficaces.

Ainsi, des techniques industrielles de façades et toitures végétales, dont on allège les performances hydrologiques, thermiques et climatiques, sont d'ores et déjà disponibles, des projets de forêts urbaines sont annoncés et engagés.

Avec l'augmentation de la population urbaine, il est nécessaire de trouver des compromis afin d'offrir un cadre de vie sain et agréable aux habitants.

Ces bienfaits du végétal, désignés sous l'appellation de services écosystémiques, font l'objet de nombreuses études, de plus en plus reconnues et mis en avant dans les projets et politiques urbaines locales, nationales et internationales.

ATTENTES VIS-À-VIS DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les acteurs de l'aménagement élaborent des réponses à partir des nouvelles pratiques mises en oeuvre dans les projets urbains, ils transposent, adaptent et apprennent de leurs erreurs. Cependant, un constat est fait : les approches ne peuvent être standardisées, mais au contraire, la diversité des voies est reconnue, justifiée par la diversité des villes, leur histoire, leur type de développement, leur taille, leur patrimoine, leur contexte climatique etc.

TANGIBILITÉ DES BIENFAITS DU VÉGÉTAL EN VILLE

Pour une aide à la décision efficace, il apparaît donc nécessaire de mieux connaître les phénomènes physiques et les paramètres qui conditionnent les rôles relatifs de la végétation et de la forme urbaine.

L'étude de la littérature scientifique sur les bienfaits du végétal en ville (Plante & Cité, 2014) montre que leur évaluation est souvent difficile car leurs déterminants sont multifactoriels. Les contextes varient, les études ne s'appuient pas toutes sur les mêmes méthodes et certains résultats sont plus solides que d'autres en fonction de la robustesse des démonstrations existantes. On peut donc considérer que la tangibilité des bienfaits et services écosystémiques apportés par le végétal en ville varie de forte (ex: biodiversité, santé physique) à faible quand ils sont peu étudiés (lien social, tourisme).

Les études scientifiques telles que VegDUD sont importantes pour acquérir des données fondamentales, et améliorer les modèles de climatologie urbaine à partir d'une meilleure compréhension des processus physiques associés à la nature en ville.

LES QUATRE ENJEUX D'UNE APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE

Dans le cadre de VegDUD, l'étude de l'impact du végétal a été centrée sur les thématiques : micro-climat urbain, thermique du bâtiment, gestion des eaux pluviales, approche physique du confort à travers les aspects thermique et acoustique. Ces domaines ont été étudiés à travers un état des lieux (bibliographie), des approches expérimentales (deux campagnes expérimentales et des mesures terrain à long terme) et de la modélisation (scénarios). Les enjeux de qualité de l'air, de l'empreinte carbone et de la biodiversité ont également été abordés mais uniquement à travers une étude bibliographique.

POUR ALLER PLUS LOIN...



Une ville verte. Les rôles du végétal en ville. Marjorie Musy. Synthèse bibliographique VegDUD. Ed. Quæ, 199p., 2014.



Les bienfaits du végétal en ville : étude des travaux scientifiques et méthode d'analyse. Plante & Cité, Angers, 31p., 2014.

UNE TYPOLOGIE DU VÉGÉTAL URBAIN

Afin de partager une méthode commune pour travailler sur le végétal en ville, une typologie a été créée en s'intéressant aux fonctions et services rendus par les différentes formes du végétal en milieu urbain. Le projet s'est d'abord attaché à décrire la végétation en milieu urbain. De nombreuses classifications existent en fonction du point de vue des différents acteurs (paysagistes, urbanistes et architectes, gestionnaires) mais celles-ci ne permettent pas d'aborder le végétal urbain de façon systémique. De plus, la place de la végétation a évolué au cours des années et de nouvelles formes de végétalisation se développent. Afin d'obtenir une classification commune propice à un programme de recherche multidisciplinaire, le projet a retenu **quatre dispositifs de végétation** : les toitures et façades végétalisées, les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal, les surfaces enherbées, les arbres. Ces quatre dispositifs peuvent également se présenter en configuration mixte et juxtaposée comme par exemple la superposition de plusieurs strates (arborée, arbustive, herbacée).

Deux groupes de paramètres ont également été pris en considération : le mode de gestion (extensif ou intensif) et la forme urbaine.

En effet, la gestion extensive, favorable notamment à la biodiversité est de plus en plus employée car elle permet de rationaliser les coûts et de respecter l'environnement. Elle s'exprime par exemple par la réduction des intrants (engrais, produit phytosanitaires), de l'arrosage et des tontes.

À une échelle plus large, la forme urbaine dans laquelle se développe le végétal a également été prise en compte : cloisonnée dans des îlots fermés, des parcs ou des squares, en linéaire en accompagnement de voiries, en ceinture ou en trame verte.

Pour compléter cette typologie du végétal urbain, **trois échelles** ont été étudiées : le bâtiment, la rue et le quartier ou la ville.

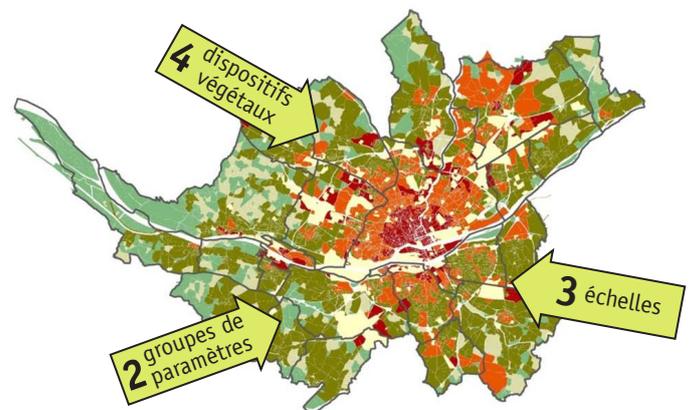


Figure 1 : Urbanisation de la ville de Nantes.



Photo n°1 : Toiture végétale de l'université de Nantes. / Photo n°2 : St Etienne. / Photo n°3 : Superposition de strate et gestion différenciée, Munich. / Photo n°4 : Paris. / Photo n°5 : Plantation sur dalle, High Line 20th Street, New-York. / Photo n°6 : Grünes Haus, Gießen, Allemagne.

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION ET CONNAISSANCE DU PATRIMOINE VÉGÉTAL

Pour étudier l'impact du végétal en ville, il faut d'abord connaître sa répartition et sa nature. Les SIG (système d'information géographique) sont le meilleur moyen de stocker et d'organiser ces informations en faisant le lien entre les données disponibles sur la végétation et leurs répartitions dans l'espace.

Pour le végétal, de nombreuses sources de données sont disponibles (Service d'espaces verts, IGN, CLC, etc.) mais elles fournissent peu d'information sur le type de végétation et les surfaces de faible superficie ne sont pas recensées. Par ailleurs, la présence de végétation est souvent sous-évaluée car les jardins privés ne sont pas pris en compte. La télédétection (images satellites et aériennes) à très haute résolution spatiale et spectrale permet d'obtenir des données plus précises sur la végétation.



Figure 2 : Apport de la télédétection haute résolution pour l'identification de la végétation. L'augmentation de la résolution spatiale permet de distinguer des espaces verts de plus en plus petits (au milieu). L'augmentation de la résolution spectrale permet de distinguer le type de végétation, ici : surface herbacée, 3 types de conifères et 5 types de feuillus (à droite). Source : LPGN, ONERA.

En mettant à jour régulièrement ces données pour une ville, le suivi de l'étalement urbain et de l'évolution de la végétation peut être réalisé de façon rapide et homogène. Les bases de données sur la répartition des différents types de surface (surface enherbée, arbres, bâtiments, voirie) à l'échelle d'une ville, sont indispensables pour la réalisation de modélisations. L'utilisation de modèles prospectifs permet de créer des scénarios sur l'évolution future des agglomérations en croisant l'occupation des sols, les données socio-économiques (attractivité liée à un bassin d'emploi, âge, etc.) et les règlements d'urbanisme (PLU, SCOT).



Photo n°7 : Avion équipé de caméra pour l'infra rouge et l'hyperspectral.

EXPÉRIMENTATION ET MESURES DU CLIMAT URBAIN

L'expérimentation et les mesures du climat urbain sont indispensables pour mieux connaître l'impact du végétal en ville et pour valider/calibrer les modèles. De nombreuses mesures ont ainsi été réalisées dans le cadre du projet VegDUD au sein de la ville de Nantes. Elles ont permis d'acquérir des connaissances quantitatives et qualitatives sur les phénomènes climatiques, hydrologiques, thermiques et acoustiques liés à la présence de végétation en ville.

À Nantes, les observations hydrométéorologiques ont été collectées au sein de l'ONEVU (Observatoire Nantais des Environnements Urbains), dont les objectifs scientifiques sont :

- (1) l'étude des interactions entre la ville et son environnement,
- (2) la détermination des bilans d'eau, d'énergie et de polluants à l'échelle d'un quartier urbain.

Des mesures permanentes sont réalisées, depuis 2006, à l'aide de capteurs positionnés dans la ville de Nantes et particulièrement dans le quartier Pin Sec. Deux campagnes expérimentales (2010 et 2012) ciblées dans le cadre de VegDUD (FluxSAP) ont permis de compléter ces mesures.

Les dispositifs de végétalisation du bâtiment ont également été étudiés : le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) à Nantes a suivi le comportement hydrologique de plusieurs types de toitures végétales (bacs de 1,50m de côté), et le LaSIE (Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement) à La Rochelle a étudié l'impact des toitures et façades végétalisées dans la rue sur une maquette à l'échelle 1/10. Des mesures *in situ* de l'impédance acoustique d'une façade et de toitures végétalisées ont été réalisées par l'Ifsttar (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux), à Nantes.



Photos n°8 (en haut) : Façade végétale implantée sur le banc expérimental ClimaBat et instrumentée. Photo n°9 : Jardin instrumenté (en premier plan la cloche de mesure d'évapotranspiration). Photo n°10 : Instrumentation sonore d'une façade végétale sur un bâtiment. Photo n°11 : Mesures des caractéristiques optiques de la toiture végétalisée du banc expérimental ClimaBat.

MODÉLISATION DES IMPACTS DU VÉGÉTAL EN VILLE

Plusieurs modèles ont été utilisés et développés, leur spécificité permet d'évaluer des enjeux et des échelles différentes (cf Tableau 1).

Pour la modélisation des effets de la végétation, les modélisateurs sont amenés à faire des choix sur les variables pour représenter la végétation à différentes échelles. De plus, la précision des descriptions du végétal et des interactions avec son environnement dépend des enjeux étudiés et de l'échelle d'appréhension.

Les résultats issus des différentes modélisations sont à prendre avec prudence. Ils correspondent à des configurations spécifiques et sont obtenus à partir d'hypothèses qui sont simplificatrices car les modèles physiques urbains ne permettent pas une description fine du végétal (qu'il serait par ailleurs difficile de documenter) et qui ne correspondent pas toujours aux pratiques des gestionnaires. De plus, ils sont validés sur des périodes et/

ou des lieux spécifiques qui ne sont pas forcément extrapolables à des situations météorologiques ou géographiques différentes.

La prise en compte de la végétation dans les différents modèles demande un travail important de validation. Certains résultats issus des modélisations n'ont pu être validés avant la réalisation de ce document et donneront lieu à des restitutions ultérieures.

Toutefois, les premiers résultats mettent en évidence des tendances d'évolutions entre les situations de référence et les différents scénarios de végétalisation ainsi qu'entre dispositifs.

Ce projet a permis de progresser quant à la prise en compte de la végétation dans les modèles d'hydrologie et de climatologie urbaine. La complexité et la variété des configurations de végétalisation ouvrent de nombreuses perspectives de recherche et d'amélioration.

Tableau 1 :

Thématiques et dispositifs étudiés en fonction des modèles

Modèle	URBS (Urban Runoff Branching Structure)	TEB (Town Energy Balance)	Solene-Microclimat	VegEnvelope	TLM (Transmission Line Matrix)	ARPS (Advanced Regional Prediction System)
Description	Modèle d'hydrologie urbaine	Calcule les échanges d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère	Modèle de thermique des bâtiments (thermo-radiatif) couplé avec un modèle aérodynamique (Code Saturne)	Modèle d'enveloppe végétalisée (peut être couplé avec le code de simulation thermique dynamique TRNSYS)	Modélisation de phénomènes ondulatoires	Modèle de calcul des transferts thermo-hygro-aérodynamiques dans la canopée urbaine
Echelles modélisées	Du quartier à un petit bassin versant	Du quartier à l'agglomération	Le bâtiment dans son environnement, rue et quartier	Le bâtiment	La rue et les rues voisines	Plusieurs quartiers
Thématiques étudiées						
Acoustique					X	
Thermique du bâtiment		X	X	X		
Hydrologie	X	X				
Climat urbain		X				X
Confort extérieur		X	X			X
Dispositifs étudiés						
Façades végétales			X	X	X	X
Toitures végétales	X	X	X	X	X	X
Surfaces enherbées		X	X			X
Arbres	X	X	X			X
Noues	X					
Structures	IFSTTAR	CNRM / IFSTTAR	CERMA	LaSIE	IFSTTAR	EPHYSE / LMF

LES 4 FICHES TECHNIQUES VEGDUD

▶ FICHE 1 :
TECHNIQUES ALTERNATIVES DE GESTION DES
EAUX PLUVIALES UTILISANT LE VÉGÉTAL

▶ FICHE 2 :
TOITURES ET FAÇADES VÉGÉTALISÉES

▶ FICHE 3 :
ARBRES

▶ FICHE 4 :
SURFACES ENHERBÉES

► FICHE 1 :

TECHNIQUES ALTERNATIVES DE GESTION DES EAUX PLUVIALES UTILISANT LE VÉGÉTAL

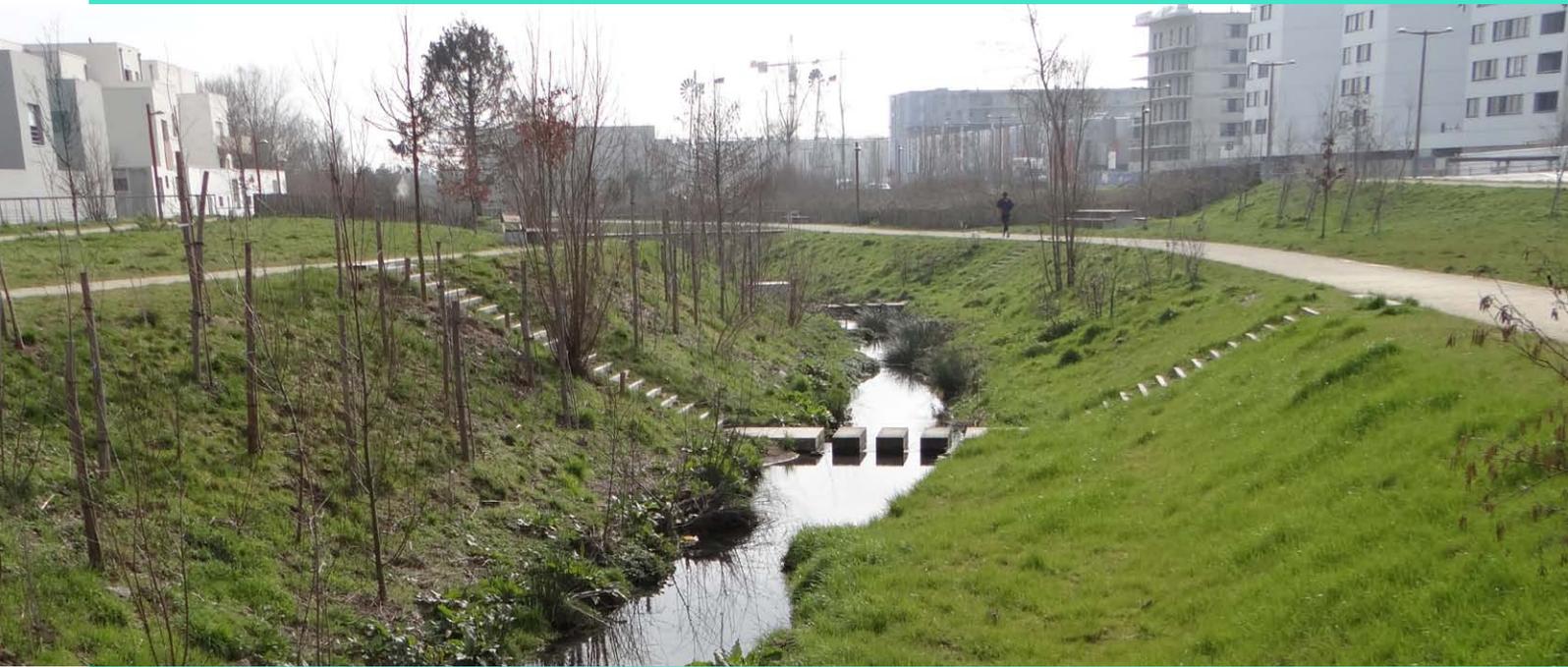


Photo n°12 : Quartier Bottière-Chénaie, Nantes.

L'artificialisation des zones urbaines liées à l'urbanisation modifie la surface (imperméabilisation des sols) et le proche sous-sol (construction de réseaux enterrés et tunnels). Cette artificialisation des sols a pour conséquence d'augmenter le ruissellement de l'eau, ce qui consécutivement induit :

- une augmentation des volumes d'eau collectés et à gérer, de la vitesse d'écoulement et de fait, un risque d'inondation accru,
- une diminution de l'infiltration et un assèchement des sols,
- une concentration de la charge polluante des eaux avec un risque accru de pollution des milieux récepteurs en aval.

La diminution du ruissellement permet de diminuer le risque d'inondation, d'éviter le surdimensionnement coûteux des réseaux, de diminuer la charge polluante des eaux et de limiter la dégradation des sols et des infrastructures liées à l'érosion.

L'infiltration des eaux pluviales permet le stockage de l'eau dans le sol pendant les périodes pluvieuses. Ensuite, cette eau peut être utilisée par la végétation par évapotranspiration et ainsi potentiellement contribuer à rafraîchir l'atmosphère urbaine en période estivale.

Aujourd'hui, les dispositifs de gestion des eaux pluviales à ciel ouvert sont conçus comme des espaces multifonctionnels, ce qui favorise leur intégration paysagère et leur bon fonctionnement. Ils participent ainsi à l'amélioration du cadre de vie.

GESTION DES EAUX PLUVIALES : LES TECHNIQUES ALTERNATIVES

La solution classique de gestion des eaux pluviales consiste à recueillir l'ensemble des précipitations tombées sur les surfaces imperméables (toitures, voiries, etc.) et de les diriger vers un réseau d'eau pluviale souterrain afin de les évacuer le plus rapidement possible. Basé sur le principe de gestion « à la source », au plus près de la surface qui reçoit les précipitations, les modes de gestion dits « alternatifs » sont de plus en plus employés en milieu urbain. Ils s'appuient sur des systèmes qui ralentissent les flux, les stockent temporairement, voire les infiltrent sur place, tout en favorisant l'évaporation et l'évapotranspiration. La gestion alternative que nous traitons dans cette fiche fait appel à des dispositifs végétalisés.

LA NOUE PAYSAGERE

Une noue est un fossé large et peu profond et dont les rives sont en pente douce. L'ouvrage assimilé à un léger modelage du terrain est totalement intégré à l'aménagement (on ne pourra remarquer qu'un léger décaissé). La collecte des eaux se fait par ruissellement sur les surfaces adjacentes ou par connexion de canalisations recevant l'eau pluviale, issue des gouttières de toitures ou d'un réseau pluvial traditionnel.

Sur site pentu, des cloisons peuvent être mises en place afin d'augmenter le volume de stockage, de réduire les vitesses d'écoulement et de favoriser l'infiltration et l'évapotranspiration. La vidange d'une noue se fait par infiltration (sol perméable) et/ou par un exutoire qui permettra l'évacuation de l'eau à débit régulé. L'exutoire peut être le réseau d'assainissement pluvial traditionnel, le milieu hydraulique superficiel ou encore un autre système de stockage/infiltration.

LE BASSIN PAYSAGER SEC OU EN EAU

Le bassin paysager est un espace végétalisé peu profond, perméable ou étanche, qui permet de stocker temporairement les eaux de pluie et de ruissellement. L'alimentation se fait par ruissellement direct ou par canalisations/avaloirs et sa vidange par infiltration et/ou évacuation à débit régulé vers un exutoire.

LES JARDINS DE PLUIES

Les jardins de pluie, ou jardins bio-filtrants, sont utilisés dans l'aménagement urbain actuel à une échelle très locale (parcelle). Ces systèmes peuvent être installés dans des dépressions du sol, et plantés en utilisant de la végétation susceptible d'optimiser la rétention des polluants et l'infiltration. Ainsi les eaux tombant sur les surfaces imperméables de la parcelle sont dirigées vers ce dispositif. Le réseau d'eau pluviale sert alors d'exutoire au jardin de pluie quand celui-ci est saturé (pluie intense ou trop fréquente).

TOITURES VEGETALES ET VEGETATION HORS-SOL

Ces aménagements viennent se superposer à des surfaces classiquement imperméables. Ils sont constitués de trois couches : la végétation, le substrat et la couche drainante. Le substrat, support de la végétation possède une capacité de rétention en eau et sert de réservoir (stockage). Dans le cadre de cette synthèse, les toitures végétales font l'objet d'une fiche spécifique.

Des aménagements multifonctionnels :

Ces aménagements végétaux de gestion des eaux pluviales s'intègrent bien dans le paysage en créant des espaces végétaux, que ce soit le long des voiries pour les noues, sur les toitures ou dans des espaces verts pour les bassins. Ces milieux créent des habitats favorables à la biodiversité. La fraîcheur apportée par des milieux humides en ville participe à la régulation des îlots de chaleur urbains. Par leur visibilité, ils contribuent à la sensibilisation du public à la gestion des eaux pluviales. La gestion des eaux pluviales au plus près du point de chute réduit la distance de ruissellement sur les surfaces imperméables, et permet donc de réduire le risque de pollution par les hydrocarbures. Ce type d'aménagement nécessite cependant des compétences pluridisciplinaires qui doivent s'appuyer sur des formations et des échanges pour les différents acteurs, de la conception à la gestion de l'ouvrage.



Photo n°13 : ZAC St Sulpice, Rennes. / Photo n°14 : ZAC la Courrouze, Rennes. / Photo n°15 : Bassin d'infiltration, Clermont de l'Oise.

CADRE RÉGLEMENTAIRE DE LA GESTION DES EAUX PLUVIALES

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA, 30 décembre 2006) réforme plusieurs codes : environnement, collectivités territoriales, santé, construction et habitat, rural, propriétés publique etc. Son ambition est de permettre d'atteindre les objectifs de la directive cadre européenne sur l'eau (DCE) d'octobre 2000, en particulier le retour à un bon état des eaux d'ici 2015.

LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT

Chaque projet a des incidences « potentielles » sur l'environnement et notamment sur les milieux aquatiques. C'est pourquoi chaque projet pourra être soumis au code de l'Environnement qui fixe, dans son article L. 211-1, le principe d'une gestion équilibrée de la ressource visant à :

- protéger et à restaurer les écosystèmes aquatiques et les zones humides,
- protéger, contre les pollutions, les eaux superficielles et souterraines,
- préserver et développer la ressource en eau,
- lutter contre les inondations.

LE CODE CIVIL

Les propriétaires ne doivent pas :

- modifier l'écoulement naturel sur le fond inférieur (quantitativement et qualitativement),
- détourner les eaux de l'amont dans le but de se protéger et donc de modifier les écoulements sur des parcelles voisines,
- faire obstacle aux écoulements et entraîner un stockage sur la parcelle amont,
- faire s'écouler directement sur les terrains avoisinants les eaux de pluie recueillies. Ces eaux doivent être conservées, ou s'écouler sur la voie publique sans qu'elles n'engendrent de gêne.



Photo n°16 : Bords de Loire, Ile Beaulieu, Nantes.

LE CODE GÉNÉRAL DES COLLECTIVITÉS TERRITORIALES

Les communes ou les établissements publics de coopération doivent établir, entre autres, un zonage d'assainissement pluvial définissant :

- « les zones où des mesures doivent être prises pour limiter l'imperméabilisation des sols et pour assurer la maîtrise du débit et de l'écoulement des eaux pluviales et de ruissellement » ,
- « les zones où il est nécessaire de prévoir des installations pour assurer la collecte, le stockage éventuel et le traitement des eaux de pluie et de ruissellement lorsque la pollution qu'elles apportent au milieu aquatique risque de nuire gravement à l'efficacité des dispositifs d'assainissement ».

La loi du 21 avril 2004 (loi de transposition de la DCE) a renforcé la portée juridique du SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et des SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) par des modifications du code de l'urbanisme (articles L122-1, L123-1 et L124-2) : les documents d'urbanisme (SCOT, PLU et carte communale) doivent être compatibles avec les orientations définies par le SDAGE et les objectifs définis par les SAGE.

En outre, le PPRI (Plan de Prévention du Risque d'Inondation) crée des servitudes d'utilité publique intégrées dans le plan local d'urbanisme auquel toute demande de construction doit être conforme. Il en est de même pour tous les zonages à valeur réglementaire.

EAUX PLUVIALES ET POLLUTION

Après dispersion dans l'atmosphère (production industrielle, gaz d'échappement, poussières, etc.), certains polluants retombent et s'accumulent sur le sol par dépôt direct ou lors d'événements pluvieux de faibles intensités. Chaque surface possède un seuil de mouillage qui lui est caractéristique. Lorsque la quantité d'eau de pluie tombée dépasse ce seuil, le ruissellement commence, provoquant alors l'entraînement de divers polluants :

- déjections d'animaux,
- engrais,
- hydrocarbures,
- produits d'usure de la chaussée,
- résidus de travaux,
- déchets urbains (mégots, papiers,...),
- particules de zinc des gouttières.

L'étude des techniques alternatives et les retours d'expériences ont montré qu'elles peuvent constituer des ouvrages de dépollution (décantation, filtration et phytoremédiation).

LA DÉCANTATION

Dans un bassin de rétention, sous l'effet de leur poids, les particules contenues dans l'eau ont une tendance naturelle à se déposer au fond du bassin selon une certaine vitesse appelée vitesse de sédimentation (formant au final ce qu'on appelle des boues de décantation). En sortie de bassin, l'eau est moins chargée en particules et donc en polluants.

Pour que la décantation soit optimale et que les particules ne soient pas emmenées vers l'exutoire, on cherche lors de la conception de l'ouvrage à :

- réduire la vitesse d'écoulement (augmentation de la section),
- diminuer la hauteur de chute des particules (bassin peu profond),
- augmenter le temps de séjour dans le bassin.

Avertissement : attention, il n'existe pas de « recettes » et les enjeux sanitaires liés aux pollutions nécessitent de s'appuyer sur des diagnostics précis avant d'engager une action.

LA FILTRATION

L'effluent passe à travers un « filtre » qui piège les particules. Ce « filtre » peut être un lit de sable, un filtre papier ou encore un tamis. Il est important de préciser que dans les techniques alternatives on ne trouve pas de tels filtres mais différents matériaux et/ou structures jouant le même rôle.

On peut trouver :

- des systèmes dégrilleurs qui retiennent les très gros éléments et objets, les « flottants »,
- des couches de matériaux drainants qui retiennent les petites particules,
- le sol qui constitue un très bon filtre (retient les très petites particules).

LA PHYTOREMEDIATION OU LA DÉPOLLUTION PAR LES PLANTES

La phytoremédiation permet d'extraire, de contenir, ou de dégrader des polluants inorganiques ou organiques (éléments traces, hydrocarbures, autres composés organiques).

On peut distinguer trois principaux modes d'action :

- la phyto-stabilisation : mode de gestion destiné à stabiliser les éléments traces (ou « métaux lourds ») du sol. Les plantes, le sol, la matière organique, les milieux associés, réduisent la mobilité des polluants,
- la phyto-extraction : les éléments traces sont accumulés dans les parties aériennes récoltables de la plante (tiges, feuilles,...); On parle de plantes hyper accumulatrices,
- la phyto-rhizodégradation : c'est une biodégradation des composés organiques et des hydrocarbures en constituants élémentaires (minéralisation), réalisée par la plante elle-même et par les micro-organismes se développant sur ses tiges souterraines (les rhizomes) et ses racines.



Photo n°17 : Quartier de la Courrouze, Rennes.

GESTION DES EAUX PLUVIALES, CYCLE DE L'EAU, CLIMATOLOGIE

ÉCHELLE :



Bâtiment / parcelle

ENJEUX :

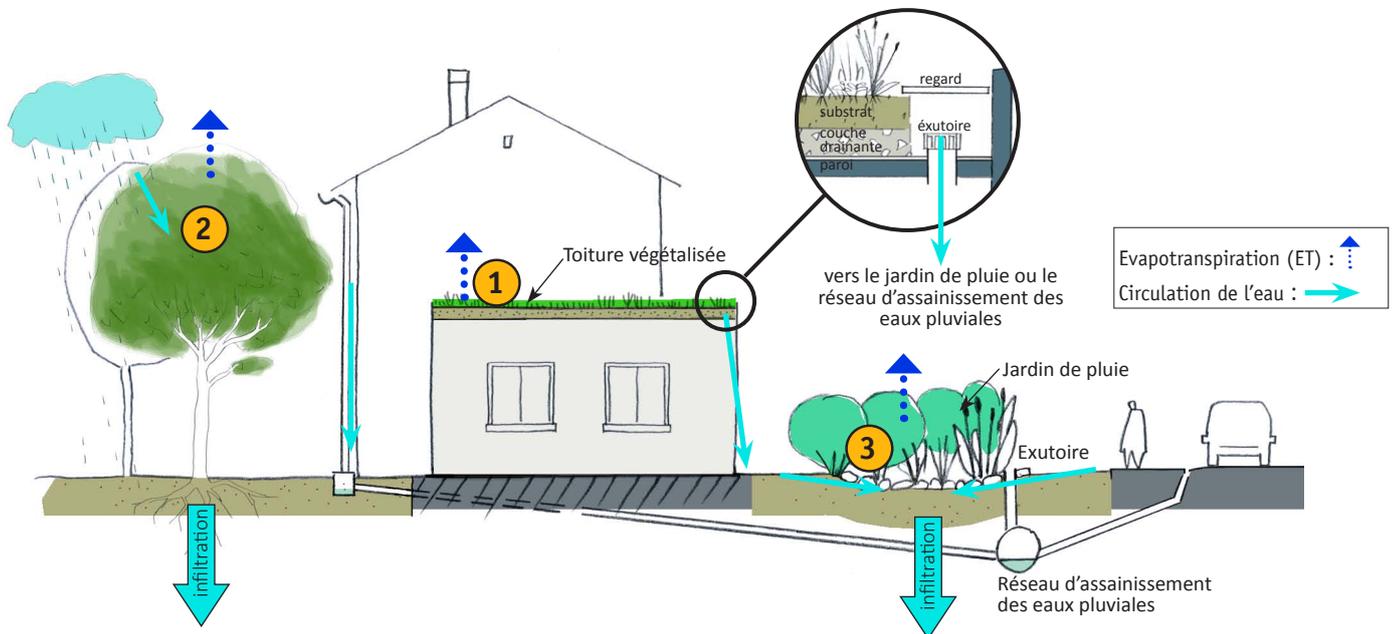


- Limiter les débits dans le réseau d'eau pluviale
- Favoriser l'infiltration

La parcelle cadastrale est reconnue par les urbanistes et aménageurs. Elle représente une cible opportune en ce qui concerne les techniques de gestion des eaux pluviales à la source qui peuvent être mises en œuvre à cette échelle élémentaire : récupération des eaux pluviales, puits d'infiltration, toitures végétalisées.

Figure 3 :

Dispositifs de végétalisation permettant de gérer, à l'échelle de la parcelle, les eaux pluviales



- 1 Une toiture végétalisée permet d'avoir une zone tampon pour la pluie tombant sur le toit : elle stocke une partie de la pluie jusqu'à saturation du substrat et, par rapport à un toit en pente, ralentit la vitesse de ruissellement (même si le substrat est saturé). La quantité d'eau stockable au niveau de la toiture dépend de la nature et de l'épaisseur du substrat alors que la diminution des vitesses de ruissellement relève du type de végétation et du système de drainage. L'eau stockée retourne en partie dans l'atmosphère par évapotranspiration et permet de diminuer les consommations d'énergie pour la climatisation (voir fiche : toitures et façades végétalisées).
- 2 Les arbres en feuilles interceptent la pluie avant qu'elle atteigne le sol. Ils limitent ainsi le ruissellement sur les surfaces urbaines, tout du moins pour les premiers millimètres de pluie de faibles intensités. En hiver, ce phénomène est moins vrai : le ruissellement sur les surfaces ligneuses et le tronc peut-être important.
- 3 Les jardins de pluie (ou autres dispositifs d'infiltration) permettent l'infiltration et le stockage temporaire des eaux recueillies sur les zones imperméables de la parcelle (voirie, terrasse ou toiture classique). De façon générale, la végétation favorise l'infiltration. Elle limite le colmatage et la présence de racines, aère les sols. Ainsi, pour des pluies de faible intensité, l'intégralité de l'eau reçue sur la parcelle est infiltrée sur place. En cas de forte précipitation, les ouvrages d'infiltration et de stockage sont équipés de surverse ou exutoire, évacuant le trop plein vers les réseaux d'assainissement des eaux pluviales.

Une parcelle peut correspondre à une maison et son jardin dans une zone pavillonnaire, mais aussi à un ensemble d'immeubles accompagnés d'espaces verts communs. Dans ce dernier cas, les zones d'infiltration et de stockage temporaire sont souvent des bassins d'infiltration ou des noues, adaptés à des surfaces contributives plus importantes.

GESTION DES EAUX PLUVIALES, CYCLE DE L'EAU, CLIMATOLOGIE

ÉCHELLE :



Quartier/ville

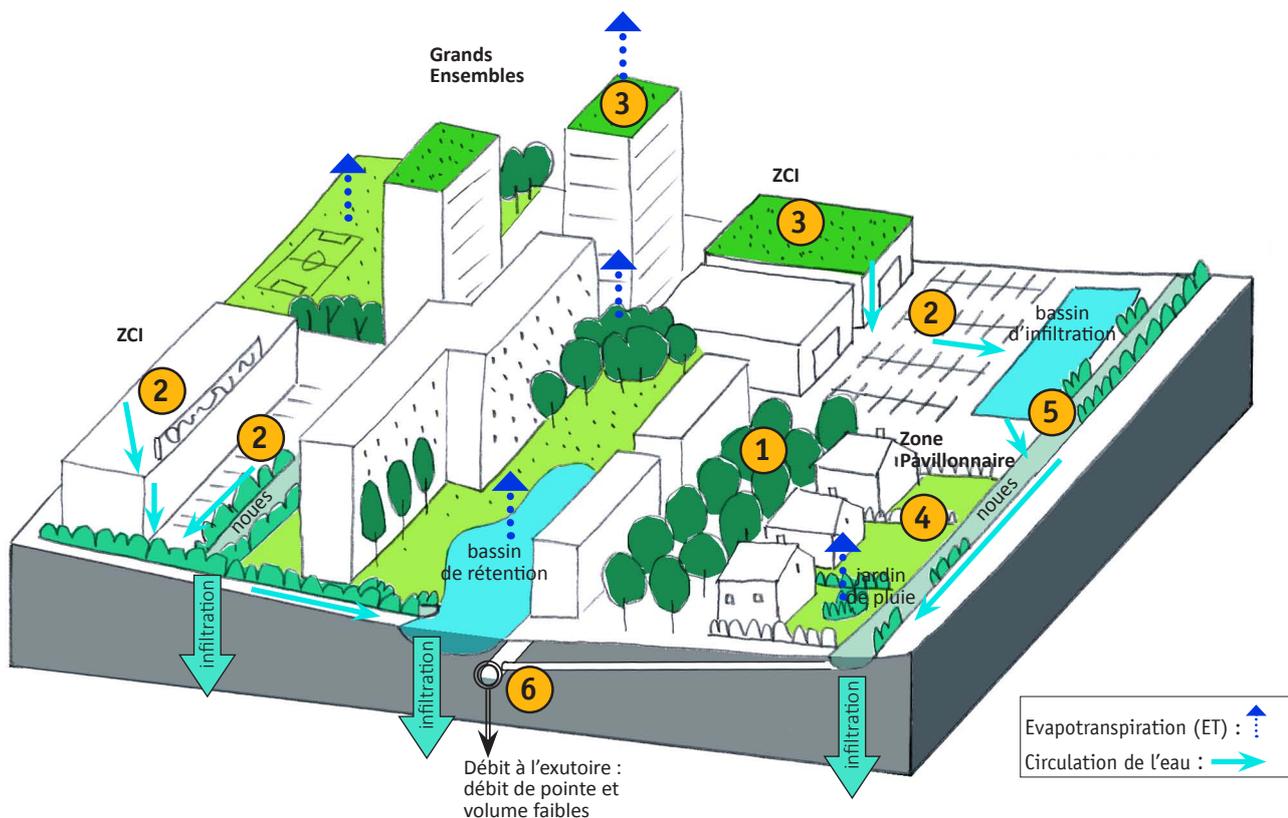
ENJEUX :



- Diminution du ruissellement
- Respect du cycle de l'eau
- Ilot de chaleur urbain

Figure 4 :

Dispositifs de végétalisation permettant de gérer les eaux pluviales à l'échelle du quartier ou de la ville



Les aménagements de la gestion alternative des eaux pluviales à l'échelle du quartier ou de la ville :

- 1 Les arbres en feuilles ralentissent le ruissellement en interceptant la pluie avant le sol. L'effet est d'autant plus intéressant si les surfaces situées sous les arbres sont imperméables.
- 2 La connexion des surfaces imperméables (voiries, parkings) avec des noues et à des bassins augmente l'infiltration et le stockage de l'eau dans le sol.
- 3 Les toitures végétalisées favorisent le stockage temporaire de l'eau de pluie et l'évapotranspiration.
- 4 L'infiltration sur la parcelle diminue les volumes d'eau dans le réseau d'eau pluviale, le stockage temporaire réduit le débit de pointe.

- 5 Il est possible d'interconnecter ces dispositifs en les disposant en série les uns à la suite des autres. Un bassin peut servir d'exutoire à une noue et inversement, une noue peut servir d'exutoire à un bassin qui aurait atteint sa capacité maximum. Ces deux dispositifs peuvent aussi servir à recevoir l'eau issue des toitures végétalisées ou des jardins de pluie si ceux-ci sont saturés. L'intérêt est de répartir les flux et le stockage temporaire des eaux pluviales dans différents ouvrages qui servent à tamponner, à écrêter le débit de pointe final.
- 6 L'ensemble de ces aménagements diminue les débits de pointe et les volumes à l'exutoire (réseau d'eau pluviale ou milieu naturel).

Pour des pluies exceptionnelles, l'intensité des précipitations peut saturer les capacités de stockage des ouvrages. Les espaces publics inondables permettent de gérer ces situations en stockant provisoirement l'eau dans des zones prévues à cet effet.

Résultat VegDUD

Impact des différents dispositifs à l'échelle d'un quartier

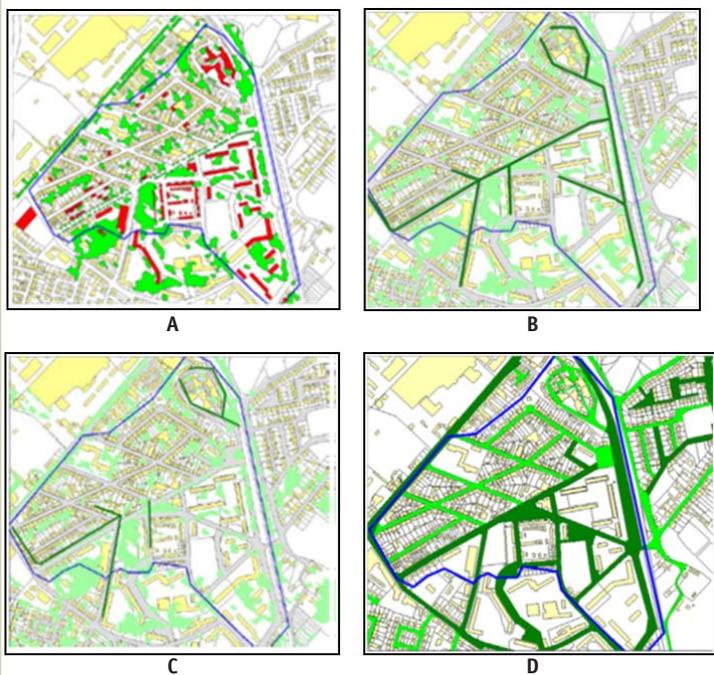


Figure 5 : Scénarios modélisés : Toitures végétales en rouge sur la figure (A), Noues (B), 50% de Noues sur la partie amont du bassin versant (C), Arbres d'alignement (D).

RÉSULTATS :

Les résultats pour une année de simulation (Figure 5) mettent en avant les résultats suivants pour les configurations choisies :

- les noues représentent le dispositif le plus intéressant pour diminuer le débit total à l'exutoire,
- l'effet des arbres d'alignement sur le volume ruisselé et sur l'évapotranspiration est limité, résultat lié notamment à la surface limitée pour implanter des arbres d'alignement
- les toitures végétalisées sont les dispositifs qui favorisent le plus l'évapotranspiration.

Figure 6 : Évolution du débit total et de l'évapotranspiration pour l'ensemble des scénarios d'aménagement du bassin versant du Pin Sec et pour une année de simulation (2010).



Sur les 80 événements pluvieux (hauteur de pluie > 2mm) simulés sur cette période, les débits de pointe évalués en aval du bassin versant sont globalement peu impactés par ces techniques, soit en moyenne :

- une diminution de 3% pour les scénarios « Arbres 100% » et « Noues 50% »,
- une diminution de 2% pour le scénario « Arbres 50% »,
- pas d'évolution pour les scénarios sur les toitures végétalisées et « Noues 100% »,
- une augmentation de 6 % pour le scénario « Arbres 0% ».

De plus, les débits de pointe ne sont pas diminués de façon uniforme. En effet, pour certains scénarios, les débits de pointe en fonction des événements pluvieux sont parfois réduits et parfois augmentés. Pour les noues, cela s'explique par le fait que l'infiltration de l'eau dans le sol contribue à le saturer en surface. Donc après une période pluvieuse assez longue, sur la zone située à proximité de la noue, le ruissellement va augmenter et le débit de pointe ne sera pas réduit. Le phénomène est le même pour les toitures végétalisées dont le substrat peut être saturé en eau par des événements pluvieux successifs.

> Résultats produits par l'IFSTTAR (Fabrice Rodriguez et Marie Laure Mosini) avec le modèle d'hydrologie urbaine URBS

Résultat VegDUD

Impact de la végétation sur les volumes ruisselés

SCÉNARIOS :

Modélisation de plusieurs scénarios de végétalisation de la ville de Nantes (Fig 7).
Simulation du ruissellement pour la période du 01/05/2011 au 30/09/2012.



Figure 7 : Scénarios modélisés.

À gauche : densité de végétation actuelle

Au centre : diminution uniforme de 75%.

À droite : aménagement d'environ 50% des toitures (en vert foncé) soit 8% de la surface totale du domaine d'étude. Les toitures ont 15cm de substrat. Pour chaque maille soit toutes soit aucune des toitures sont végétalisées.

RÉSULTATS :

Les évolutions sont conformes aux attentes : le ruissellement augmente avec la diminution des surfaces végétales et diminue suite à la mise en place de toiture végétale (Fig 8).

Il est intéressant de remarquer la complémentarité des dispositifs (les mailles encadrées). Sur une zone densément bâtie, où il est difficile de faire évoluer le taux de végétation au niveau du sol, les toitures végétales représentent une solution efficace pour diminuer le ruissellement.



Figure 8 : Evolution du volume ruisselé

À gauche : suite à la végétalisation des toitures , le ruissellement diminue

À droite : suite à une diminution de 75% de la végétation, le ruissellement augmente

> Résultats produits par l'IFSTTAR (Chancibault K., Allard A.) et Météo-France (Lemonsu A, De Munck C) avec le modèle de surface et d'hydrologie TEB

► FICHE 2 :

FAÇADES ET TOITURES VÉGÉTALISÉES



Photo n°18 : Groupe Scolaire Aimé Césaire, Ile de Nantes.

TOITURES VÉGÉTALISÉES

La végétalisation des bâtiments sous forme de toitures et de façades connaît un développement très important depuis le début des années 2000 en France. De moins de 100 000m² de toitures végétalisées posées par an en 2002, on est passé à plus d'un million en 2011 et ce chiffre se confirme d'année en année (Source Adivet). Ceci fait de la France, un des leaders mondiaux de la technique aux côtés de l'Allemagne.

En France, il existe trois types de végétalisation de toitures selon l'épaisseur du substrat et le type de végétation :

LA VÉGÉTALISATION INTENSIVE est la forme classique des toitures (dites) vertes. Décrite dans le DTU 43.1 (référence NF P 84-204), ses caractéristiques sont les suivantes : fortes épaisseurs, fortes charges, entretien important. La végétation, souvent de type horticole, peut être très diversifiée et de grande hauteur (arbres). Le complexe de culture est généralement composé de terre végétale, associé à une couche drainante et filtrante (Source : Règles professionnelles Adivet/csfe/UNEP,2007).

Avantages : Cette toiture est accessible au public (création de nouveaux espaces verts à usage récréatif) ; la diversité de la végétation utilisable est favorable à la biodiversité, améliore la qualité esthétique et rend possible la production vivrière.

Contraintes : La toiture doit être capable de supporter des charges très élevées, l'entretien est dit « intensif » et demande souvent la mise en place de système d'irrigations adaptés. Ces toitures nécessitent des revêtements d'étanchéité résistants à la pénétration racinaire.

LA VÉGÉTALISATION EXTENSIVE est une solution qui vise à constituer un tapis végétal permanent qui s'adapte progressivement à son milieu et fonctionne de façon quasi autonome. Ce tapis végétal est obtenu par une association de plantes spécialement adaptées (type Sedum entre autre) qui se reproduisent in situ. La couche végétale repose sur un support de culture, léger à dominante minérale qui permet son ancrage et son alimenta-

tion hydrique et minérale. Ce substrat se substitue à la terre végétale des Toits Terrasses Jardins. La couche de drainage qui constitue un des éléments du système peut participer aussi à la rétention en eau.

Avantages : La charge assez légère permet de végétaliser des supports eux-mêmes légers (acier nervuré, bois). La végétalisation peut concerner des toitures pente très forte (45° et plus). Elle est bien adaptée, par ses coûts et ses modes d'implantation aux grandes surfaces de toitures. Ce type de végétalisation nécessite peu d'entretien (2/3 passages par an). L'arrosage, sauf situations particulières (zone géographique, exposition, pente), n'est pas nécessaire au-delà de la période de démarrage.

La végétalisation du bâtiment même dans sa version la plus légère peut répondre déjà aux avantages évoqués par ailleurs dans l'étude Vegdud (gestion des eaux pluviales notamment).

Contraintes : La gamme végétale est évidemment plus réduite que pour une terrasse jardin en raison d'une épaisseur de substrat limitée (> 15 cm).

Entre la végétalisation intensive et la végétalisation extensive, sont proposées des solutions de **VÉGÉTALISATION DITE SEMI-INTENSIVE**. De même que pour les solutions extensives, le support de culture (substrat) est léger, à dominante minérale. Mais la plus grande épaisseur de substrat (jusqu'à 40cm) qui caractérise ces systèmes par rapport aux systèmes extensifs doit répondre aux contraintes accrues de charges sur le support.

Cette condition étant levée, ce type de système permet de recourir à une gamme végétale élargie avec les atouts inhérents. Hormis le coût d'investissement plus élevé, la contrepartie, par rapport à l'extensif concerne l'entretien qui est forcément plus intensif, la question du système d'arrosage devant être étudié attentivement.

Les toitures végétales contribuent à la gestion des eaux pluviales en servant de réservoir et en diminuant les vitesses de ruissellement. Cette contribution est développée dans la Fiche 1 « technique de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal ».



Photo n°19 : Toiture végétale intensive, Monaco. / Photo n°20 : Toiture végétale extensive, Dardilly. / Photo n°21 : Toiture végétale semi-intensive, La Rochelle.

FAÇADES VÉGÉTALISÉES

Les différents types de façades végétalisées se distinguent par les dispositifs d'implantation des végétaux et par la distance entre la végétation et la paroi du bâti.

LA VÉGÉTATION COMME REVÊTEMENT DE FAÇADE : Il s'agit des façades végétales les plus anciennes et les plus répandues. Pour ces façades recouvertes de plantes grimpantes ou qui poussent sur un support proche de la paroi, on peut considérer que la végétation est utilisée comme revêtement extérieur des éléments de façades opaques. Elles peuvent être constituées de plantes qui s'attachent directement à la paroi ou bien qui s'enroulent autour d'un treillage ou de câbles supports.

LA VÉGÉTATION COMME ÉLÉMENT DE PAROI consiste à créer un sol artificiel vertical qui comporte un support de culture pour la végétation, de la même manière que les toitures végétales. Cette technique est récente et se développe rapidement. Depuis 2007, 20 à 45 nouvelles réalisations chaque année (soit environ 3 500 m²/an) viennent s'ajouter aux murs déjà existants. En France, le nombre de murs extérieurs végétalisés est estimé à 400 (Enquête Plante&Cit , 2013).

Appelés murs végétaux, ils peuvent constituer un élément de paroi à part entière. Les murs végétaux sont des solutions technologiques, puisqu'ils doivent incorporer des systèmes d'arrosage automatique, avec une pompe doseuse pour réaliser la solution nutritive. Il s'agit d'une technique de culture hors sol. Pour des raisons d'entretien, la solution nutritive est dos e dans des proportions permettant aux plantes de vivre, sans trop favoriser leur développement. Le système d'arrosage peut être à eau perdue (consommation d'eau importante) ou en circuit fermé (consommation d'énergie importante) et il doit faire l'objet d'une gestion hivernale rigoureuse en raison du risque de gel dans les canalisations.



Photo n°22 : Quartier des Olivettes, Nantes. / Photo n°23 : Façade végétalisée, Paris. / Photo n°24 : Végétation comme revêtement de façade, Auckland, Nouvelle-Zélande. / Photo n°25 : Quai Branly, Paris. / Photo n°26 : Quartier Vauban, Fribourg, Allemagne. / Photo n°27 : Façade végétale dans le quartier Breil-Malville, Nantes.

CADRE RÉGLEMENTAIRE DES FAÇADES ET TOITURES VÉGÉTALISÉES

Les toitures terrasses végétalisées font appel à des procédés complets d'étanchéité et de végétalisation non traditionnels visés par des Avis Techniques (ATec) ou Documents Techniques d'Application (DTA), ainsi que par des règles professionnelles. Les éléments porteurs compatibles sont indiqués dans les Avis Techniques, ils comprennent : les structures béton armé de pente comprise entre 0 et 20 %, les éléments porteurs en tôles d'acier nervurées acier et en bois de pente comprise entre 3 et 20 %.

Les procédés complets de végétation extensive (épaisseur de substrat entre 4 et 15 cm), sont constitués d'un revêtement d'étanchéité et d'un système de végétalisation qui font l'objet d'Avis Techniques et Documents Techniques d'Application. Les ATec et DTA font référence aux dispositions des règles professionnelles lorsque c'est nécessaire.

À ce jour, pour les procédés complets de végétation semi-intensive (épaisseur de substrat entre 12 et 30 cm), seules les règles professionnelles décrivent les modalités de conception et de réalisation de ce type de toiture-terrasse.

Certains systèmes de végétalisation extensive sont destinés aux toitures en pente (pente supérieure à 20%). À ce jour, ils n'ont pas fait l'objet de documents de mise en œuvre dédiés (DTU, règles professionnelles). Toutefois certains d'entre eux peuvent faire l'objet d'une évaluation tierce partie, d'une Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) ou d'une Enquête de techniques Nouvelles (ETN), qui tendent à prouver l'aptitude à l'emploi de ces systèmes. L'ATEX est une procédure rapide d'évaluation technique formulée par un groupe d'experts sur tout produit, procédé ou équipement ne faisant pas encore l'objet d'un Avis Technique, afin de faciliter la prise en compte de l'innovation dans la construction. Il en existe 3 sortes. Le type « a » vise un produit ou un procédé appliqué sur différents chantiers pendant une durée limitée et une quantité totale déterminée ; le type « b » concerne un projet de réalisation identifié, c'est-à-dire l'application d'une technique constructive sur un chantier précis à réaliser ; le type « c » s'applique à une nouvelle réalisation expérimentale d'une ou plusieurs techniques ayant préalablement fait l'objet d'une ATEX de type « b ».

Pour les façades végétalisées, il n'existe pas, à ce jour, de règles générales applicables à ce type de technologies qui restent des applications particulières. Les technologies disponibles sont peu industrialisées et ne semblent pas généralisables à l'ensemble des typologies de bâtiments. Des premières validations techniques par tierce partie devraient être faites par exemple avec des ATEX de type b avant de commencer à décrire des règles plus générales.

Les dispositions applicables aux systèmes de végétalisation visent principalement à vérifier que la fonction de l'enveloppe du bâtiment n'est pas dégradée par ce système spécifique.

Les textes applicables sont :

1. les DTU (Documents Techniques Unifiés) :

- Pour les toitures : DTU Travaux d'étanchéité 43.1 « Etanchéité des toitures terrasses et toitures inclinées avec élément porteur en maçonnerie en climat de plaine ». La végétalisation n'est pas prise en compte par les DTU pour les toitures en métal (DTU 43.3) ou en bois ou panneaux dérivés (DTU 43.4),
- et DTU Travaux de bâtiment 43.5 « Réfection des ouvrages d'étanchéité des toitures terrasses ou inclinées ».

- DTU Travaux de plomberie 60.11 « Règles de calcul des installations de plomberie sanitaire et d'eaux pluviales ». La norme NF EN 12484-1 doit être associée à ce DTU,

- DTU Maçonnerie des toitures et d'étanchéité 20.12 « Gros œuvre en maçonnerie des toitures destinées à recevoir un revêtement d'étanchéité ».

Les DTU s'appliquent aux travaux de bâtiment et proposent des clauses-types (administratives et techniques) pour des techniques traditionnelles. Ils représentent ce qui se fait couramment, et les experts d'assurances ou judiciaires s'appuient sur leur contenu.

2. Les règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées (CSFE, ADIVET, UNEP).

Certains textes généraux d'urbanisme ou propres au bâtiment sont aussi à considérer :

- les règles d'urbanisme applicables qui peuvent favoriser ou limiter le recours à la végétalisation. Notamment l'Article L111-6-2 du code de l'urbanisme qui vise à favoriser la mise en place de matériaux renouvelables ou de systèmes individuels de production d'énergie,
- les règles techniques générales applicables aux bâtiments : réglementation incendie, sismique, acoustique, thermique,
- le code de la construction et de l'habitation.

ÉVALUATIONS DES IMPACTS : CONFORT THERMIQUE, CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE, CLIMATOLOGIE

ÉCHELLE :



Bâtiment / parcelle

ENJEUX :



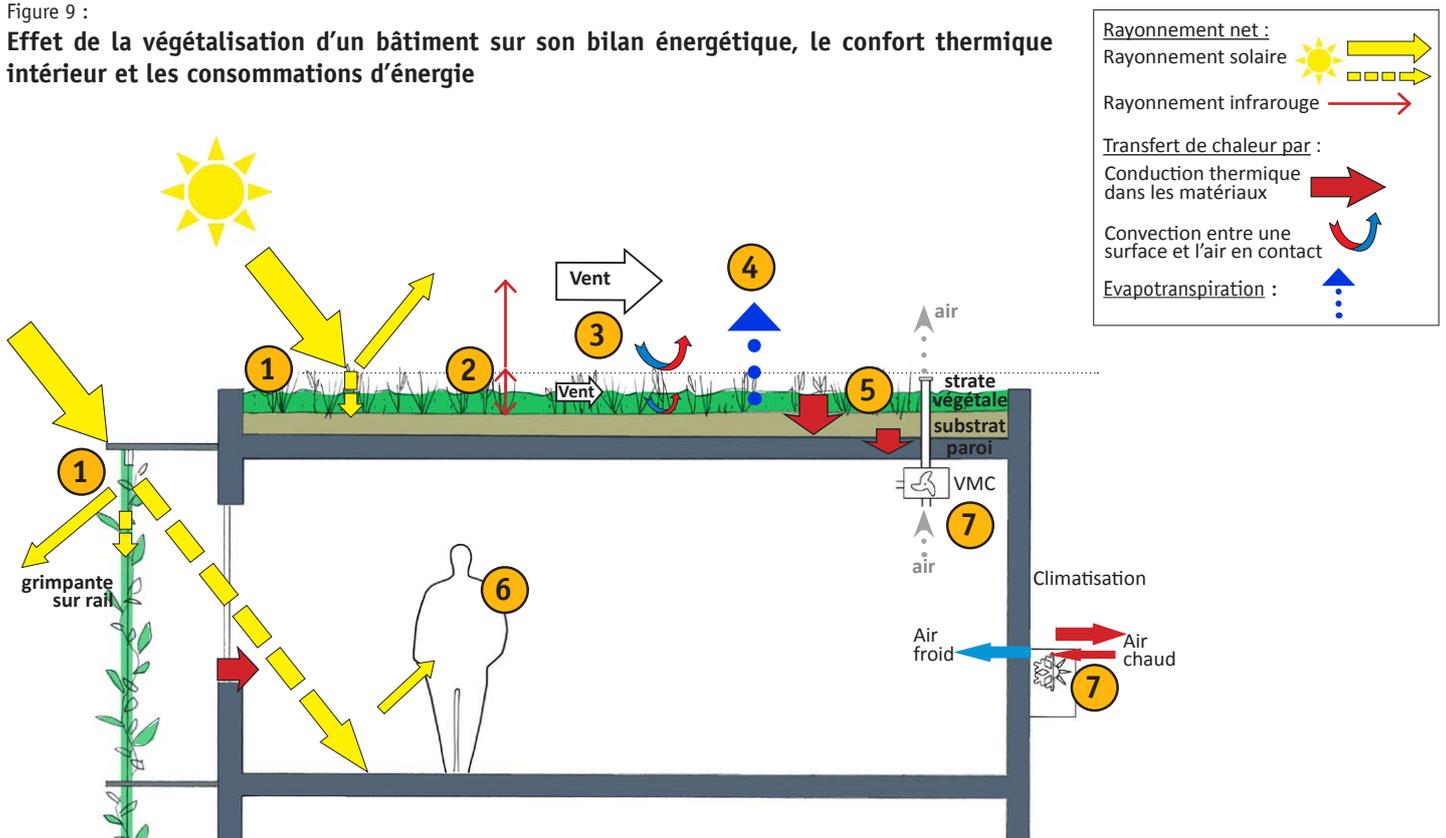
- Confort thermique
- Consommation d'énergie

Afin d'avoir une vue d'ensemble cohérente sur l'impact de la végétalisation des bâtiments, nous commencerons par l'étude de l'impact sur un bâtiment, puis sur l'impact des façades végétalisées sur le piégeage radiatif dans la configuration particulière d'une rue canyon. Enfin nous verrons l'influence à l'échelle d'une ville.

Les toitures et façades végétalisées font partie intégrante du bâtiment et doivent être prises en compte dans l'étude thermique de celui-ci : elles ont un effet direct sur les consommations d'énergies en modifiant le bilan énergétique au niveau des parois et, s'il y a une couche de substrat, en créant une couche supplémentaire entre l'extérieur et l'intérieur.

Figure 9 :

Effet de la végétalisation d'un bâtiment sur son bilan énergétique, le confort thermique intérieur et les consommations d'énergie



Légende de la figure n°9 (page précédente) :

Effet de la végétalisation d'un bâtiment sur son bilan énergétique, le confort thermique intérieur et les consommations d'énergie

Rayonnement net :

La végétation modifie les échanges radiatifs en interceptant le rayonnement :

- 1 Le rayonnement solaire intercepté est en grande partie absorbé et réfléchi (environ 30%) par le feuillage. Selon la densité du feuillage, seule une petite partie atteint le bâtiment. Les surfaces à l'ombre du feuillage se réchauffent moins que celles en plein soleil. Le système pare-soleil, en protégeant les ouvertures, évite que le soleil ne réchauffe directement l'intérieur des bâtiments.
- 2 Pour le rayonnement infrarouge, la surface ombragée par le feuillage échange avec celui-ci, et c'est la couche végétale qui échange avec l'entourage et le ciel. Le bâtiment « ne voit » plus directement le ciel, ce qui limite les pertes de chaleur par rayonnement infrarouge en été comme en hiver.
- 3 **Convection** : La végétation limite aussi les échanges de chaleur par convection entre les parois protégées et l'air ambiant. D'abord, les plantes limitent la vitesse du vent et donc le renouvellement de l'air au niveau de la surface, ce qui réduit les échanges convectifs.
De plus, dans le faible espace entre la végétation et la paroi, l'air est à une température intermédiaire comprise entre celle de la paroi et celle de l'air ambiant. Ainsi les échanges de chaleur par convection entre cette couche d'air et la paroi sont moins importants que s'ils avaient lieu directement avec l'air ambiant. Ce processus n'est pas valable pour le système pare-soleil car la distance entre la végétation et la paroi est trop importante.
- 4 **Evapotranspiration** : Tant que de l'eau est disponible, une partie de l'énergie reçue par la plante et le substrat, essentiellement sous forme de rayonnement solaire, est utilisée pour l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration des plantes (flux de chaleur latente). Cette énergie ne contribue pas au réchauffement des parois.

L'épaisseur et la nature du substrat des toitures déterminent leurs capacités de rétention en eau. Pour les toitures extensives, l'épaisseur est insuffisante pour pourvoir au besoin de la végétation tout au long de l'année. Lors de périodes sèches, pour bénéficier de l'effet rafraîchissant lié à l'évapotranspiration, il faut arroser, comme c'est le cas pour les murs végétaux. Aussi, pour un bâtiment entièrement végétalisé, les consommations d'eau seraient très importantes en période chaude.

- 5 **Conduction paroi** : Pour un bâtiment classique, les variations de température des surfaces extérieures sont très importantes. La végétation en limitant ces variations de température diminue la quantité de chaleur échangée par conduction à travers les parois.
- 6 **Confort** : Si le bâtiment n'est pas climatisé, la végétalisation permet d'améliorer significativement le confort intérieur pendant les périodes chaudes.
- 7 **Consommation d'énergie** : Le substrat sert de couche isolante supplémentaire ; l'effet d'isolation thermique augmente avec l'épaisseur du **substrat**. Les points ci-dessus font que les bâtiments végétalisés sont moins sensibles aux conditions extérieures qu'un bâtiment classique, et leurs besoins énergétiques pour maintenir une température intérieure confortable sont donc moins importants. Cependant, si le bâtiment est déjà bien isolé par des techniques conventionnelles, le bénéfice sera faible. L'influence des toitures concerne principalement le dernier étage, directement en contact avec la toiture.

Protégées contre les variations importantes de température et contre le rayonnement solaire direct, les couches d'étanchéité ont une durée de vie plus longue.

Résultat VegDUD

Impact de l'humidité du substrat sur la température de surface

Modélisation : couplage d'un modèle d'enveloppes végétalisées avec un code de simulation thermique dynamique du bâtiment (TRN-SYS).

L'eau disponible dans le substrat pour l'évapotranspiration influence fortement sa température. Le taux de saturation du substrat (S_r) permet d'exprimer l'humidité du substrat ($S_r=1$ substrat est saturé, $S_r=0$ le substrat est totalement sec).

Par rapport à l'air ambiant, la température de surface du substrat peut être jusqu'à 5°C inférieure si le substrat est très humide ($S_r=0.9$). L'importante disponibilité en eau favorise l'effet rafraîchissant lié au processus d'évapotranspiration.

Par contre, la température de surface du substrat peut être jusqu'à 20°C supérieure à celle de l'air ambiant pour un substrat sec ($S_r=0.1$) : le faible albédo de la végétation (inférieur à 20%) entraîne une absorption importante du rayonnement solaire et une augmentation rapide de sa température. Dans ce cas, une surface réfléchissante ayant un albédo important (surface peinte en blanc par exemple) sera plus efficace pour lutter contre le réchauffement du bâtiment.

Donc, l'effet bénéfique des toitures en période estivale dépend de la quantité d'eau disponible.

> Résultats produits par le LaSIE (Laboratoire des Sciences pour l'Ingénieur), Bozonnet E. Djedjig R.

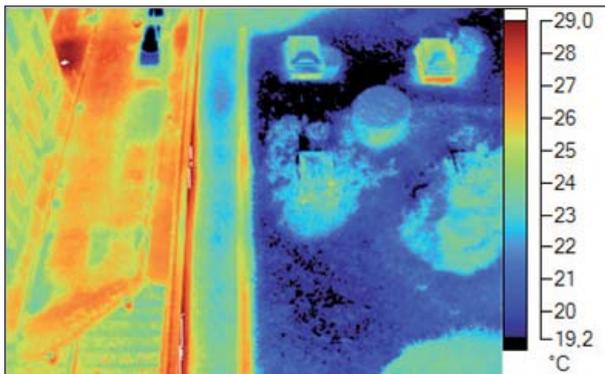


Figure 10 : Thermographie d'une toiture végétale (Source APUR 2011). La température de surface de la toiture végétale est de 5 à 10°C inférieure à la température des surfaces dans la rue en contrebas.

ÉVALUATIONS DES IMPACTS : CONFORT THERMIQUE, CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE, CLIMATOLOGIE

ÉCHELLE :



Rue

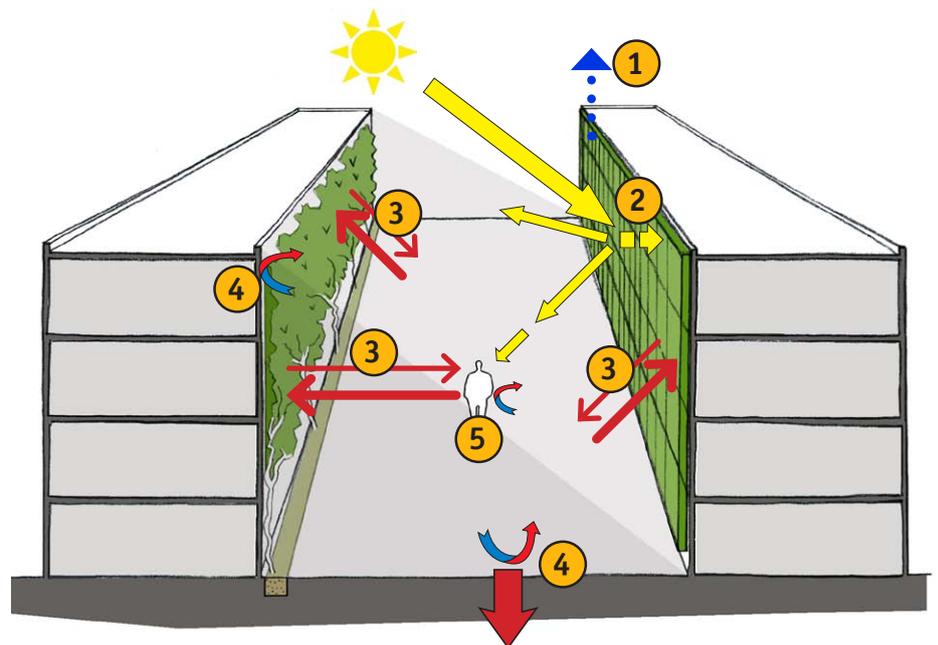
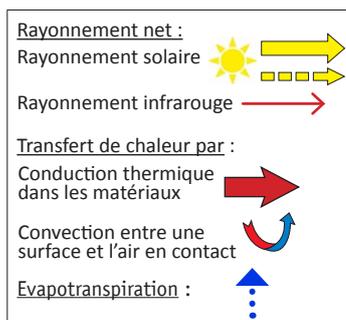
ENJEUX :



- Confort thermique
- Consommation d'énergie

La géométrie urbaine représente un piège radiatif (cf. Des clés pour comprendre, p. 56). Nous allons voir comment les façades végétales diminuent les effets du piégeage radiatif dans le cas représentatif d'une rue canyon (les toitures végétales n'ont que peu d'influence directe sur les conditions dans la rue) :

Figure 11 :
Influence des façades végétalisées dans une rue canyon



- 1 Évapotranspiration :** L'évapotranspiration utilise une grande partie de l'énergie reçue par rayonnement et entraîne une augmentation de l'humidité dans la rue. C'est ce processus qui permet au feuillage de rester à une température proche de celle de l'air ambiant.
- 2 Rayonnement net :** La végétation absorbe 70% du rayonnement solaire qu'elle reçoit (albédo inférieur à 0.2). Ainsi par rapport à une façade minérale ayant un albédo plus important (une façade blanche a un albédo supérieur à 0.5), la façade végétalisée réfléchira moins de rayonnement solaire vers les autres éléments de la rue (façade opposée, sol et passant).
- 3 Rayonnement IR :** Le feuillage des façades végétalisées reste à une température proche de celle de l'air ; ainsi, les surfaces environnantes (dont les citadins) échangent de l'énergie par rayonnement infrarouge avec une surface végétale de température peu élevée l'été. Ces modifications dans le fonctionnement radiatif de la rue limitent l'augmentation des températures de l'ensemble des surfaces.
Convection : La diminution des températures de surface dans la rue diminue le transfert de chaleur à l'air par convection et donc sa température.
- 4 Confort thermique :** Pour une journée chaude et ensoleillée, la diminution de la température radiante moyenne (températures des façades), du rayonnement solaire réfléchi et de la température de l'air améliorent le confort dans la rue. Par contre, l'augmentation de l'humidité peut avoir l'effet inverse.
- 5 Consommation d'énergie :** En période estivale, la végétalisation d'une façade apporte un bénéfice sur les consommations d'énergie du bâtiment en vis-à-vis car il reçoit peu de rayonnement en provenance de celle-ci. Si le bâtiment en question est déjà isolé ou végétalisé le gain est négligeable. Par ailleurs, la diminution de la température dans la rue est également favorable à une diminution des consommations.

Il faut cependant noter que dans le cas de l'utilisation d'un traitement de l'air dans le bâtiment, l'humidité de l'air introduit peut induire des consommations supplémentaires du système.

Si l'eau vient à manquer, l'évapotranspiration diminuera, la température du feuillage augmentera et les effets des façades dans la rue seront moins importants. Pour les murs végétaux, l'irrigation régulière évite que l'évapotranspiration ne diminue.

Résultat VegDUD

Impact des façades végétalisées sur le confort thermique

• DANS LA RUE

SCÉNARIO :

Le confort thermique est évalué dans la rue, à 16h et pour les conditions météorologiques du 8 juillet 2010 sur Nantes. De nombreuses configurations ont été évaluées : différentes orientations de la rue (Nord Sud, Est Ouest, et Nord-est Sud-ouest) et hauteurs (H) et largeur (L) de rue : H et L = 14 m, H = 21 m et L = 14 m, H et L = 21 m). La configuration de référence est une rue complètement minérale et le scénario végétalisé représente une rue avec deux alignements d'arbres de 9m de haut. Les arbres ne manquent pas d'eau : l'évapotranspiration est donc maximale.

RÉSULTATS :

Les parties végétalisées ne se réchauffent pas sous l'influence du rayonnement solaire. L'effet sur la température de l'air est faible mais la diminution des émissions du rayonnement infrarouge depuis les façades vers les passants améliore son confort thermique.

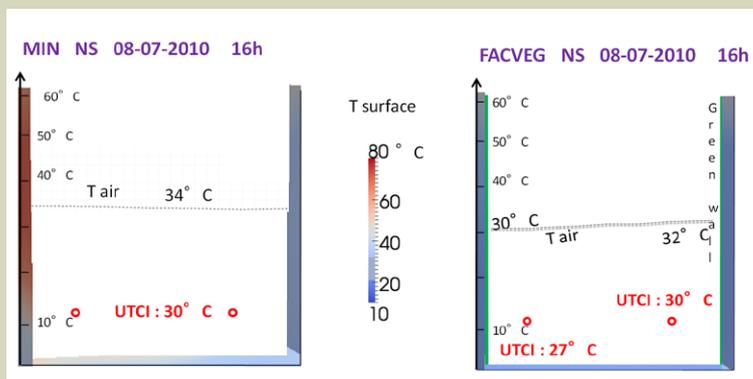


Figure 12 : Évolution des conditions dans une rue entre le cas sans végétation (à gauche) et dans le cas où les façades sont couvertes par des murs végétaux (à droite). La rue est large de 21m et haute de 21m, elle est orientée Nord Sud. L'UTCI (Universal Thermal Climate Index) représente la température ressentie pour un passant (calculé pour une humidité de 50% et un vent de 0.9m/s). T air est la température de l'air à 2m au dessus du sol, MRT est la température radiante moyenne au niveau du sol.

• DANS LE BÂTIMENT

La protection d'un bâtiment (mal ou pas isolé) par des surfaces végétales permet d'améliorer le confort à l'intérieur de celui-ci (Figure 13). L'effet des toitures ne se limite pas au dernier étage et la végétalisation des bâtiments en vis-à-vis a également un impact. L'apparition d'inconfort froid est facilement évitable en aérant durant la journée (apport d'air chaud depuis l'extérieur).

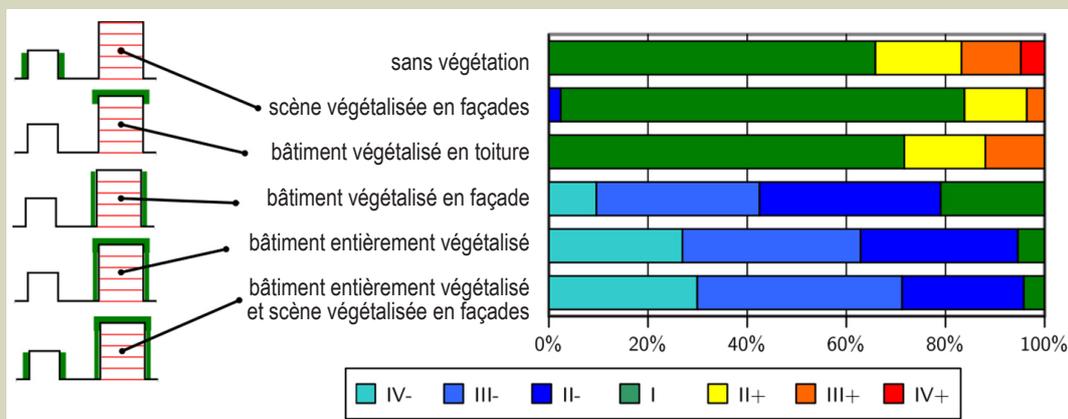


Figure 13 : Impact des toitures et façades végétalisées sur le confort thermique à l'intérieur des bâtiments : pour une semaine chaude (maximum de 30°C) mais pas caniculaire (la température passe sous les 20°C chaque nuit) et pour un bâtiment sans isolation. I correspond à des conditions thermiques agréables, IV- à un inconfort froid, et IV+ à un inconfort chaud et II et III sont des conditions intermédiaires considérées comme acceptable. (Source MalysL. Thèse).

A l'échelle d'un bâtiment, si celui-ci est entièrement végétalisé et que l'on souhaite maintenir l'effet rafraichissant lié à l'évapotranspiration, les consommations d'eau devront être supérieures à l'apport pluviométrique sur le toit.

> Résultats produits par le CERMA (Szucs A., Malys L.) avec le modèle : Solene-microclimat

ÉVALUATIONS DES IMPACTS ACOUSTIQUES

ÉCHELLE :



Rue

ENJEUX :



- Impact acoustique

Les nuisances sonores en milieu urbain sont d'origine multiple : transports terrestres et aériens, activités humaines, etc. Leur perception dépend de nombreux facteurs, comme par exemple la nature de la source, l'heure du jour (ou de la nuit) ou encore le « vécu sonore » (le ressenti) de chaque citoyen. L'occultation des sources de bruit par un écran végétal semblerait atténuer leur perception.

Les dispositifs de végétalisation des bâtiments jouent un double rôle : principalement un rôle d'absorption du son par le substrat, et, dans une moindre mesure, un rôle de diffusion du son par le feuillage.

Ainsi, le substrat absorbe davantage le son qu'une surface minérale. Cette atténuation est d'autant plus importante que le substrat est poreux, que le son est aigu (hautes fréquences) et qu'il subit de multiples réflexions dans la rue.

Résultat VegDUD

Impact de revêtements végétaux sur les ambiances sonores dans une rue canyon

À partir de mesures *in situ* d'impédance acoustique permettant de caractériser les propriétés d'absorption et de réflexion des revêtements végétaux (façades et toitures), la propagation du son dans une rue canyon a pu être modélisée. De nombreux scénarios ont ainsi été évalués : de la configuration de référence pour laquelle l'ensemble des façades et des toitures des bâtiments est entièrement minéral et donc parfaitement réfléchissant, au cas extrême où l'ensemble de ces surfaces est végétalisé.

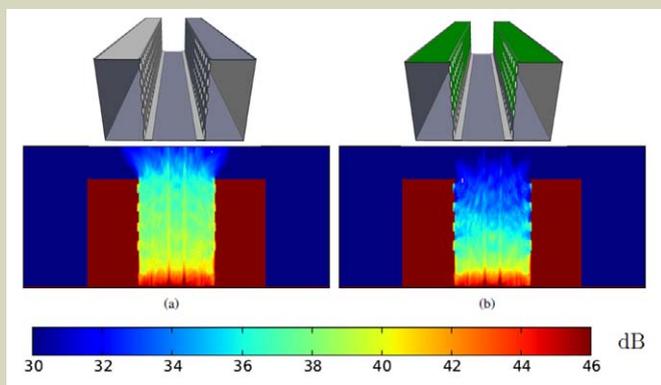


Figure 14 : Cartographies des niveaux sonores à 100 Hz pour :

- (a) le scénario pour lequel toutes les surfaces sont parfaitement réfléchissantes,
- (b) celui pour lequel les 4 premiers étages ainsi que les toitures des deux bâtiments sont végétalisés.

L'effet de la végétalisation des façades est insignifiant en bas de la rue. Entre la configuration de référence et le cas extrême, l'effet de la végétation est notable dès le premier étage des façades sur toute la largeur de la rue. Un gain de l'ordre de 5 dB est ainsi observé entre ces deux scénarios pour les basses fréquences (à 100Hz).

Dans une telle rue canyon, la végétalisation des toitures n'a aucun effet perceptible, pour les sources et les indicateurs acoustiques considérés.

Concernant l'atténuation des niveaux sonores en-dehors de la rue (de l'autre côté des bâtiments), les prévisions numériques montrent qu'il est plus efficace de végétaliser les étages supérieurs des bâtiments que les étages inférieurs (Figure 15).

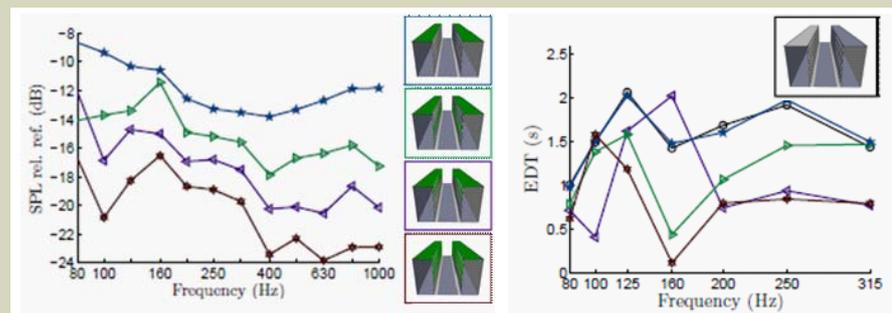


Figure 15 : Niveaux sonores par rapport à la situation sans végétation (à gauche) et temps de réverbération EDT (à droite). Les sources sonores sont localisées dans la rue et les effets sont évalués à l'extérieur de la rue.

Les valeurs des différents indicateurs acoustiques (niveau sonore SPL et temps de réverbération EDT) doivent être prises au sens de tendances, et en considérant avec attention l'importante variabilité des propriétés acoustiques des différentes surfaces végétales, ainsi que leur évolution dans le temps (par exemple saisonnière).

> Résultats produits par l'IFSTTAR ; Laboratoire d'Acoustique Environnementale (Guillaume G., Gauvreau B.)

ÉVALUATIONS DES IMPACTS : CONFORT THERMIQUE, CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE, CLIMATOLOGIE

ÉCHELLE :



Quartier/ville

ENJEUX :



- Ilot de chaleur urbain
- Confort thermique extérieur
- Consommation d'énergie

La végétalisation des bâtiments permet d'avoir une influence sur les causes de l'îlot de chaleur urbain :

- en protégeant les bâtiments du rayonnement solaire ce qui diminue ainsi le phénomène de stockage de chaleur pendant la journée et le réchauffement nocturne de l'air,
- en consommant de l'énergie par évapotranspiration : rafraîchissement de l'air et diminution des températures de surface.

Les toitures végétales ont aussi un impact sur la gestion des eaux pluviales ; en fonction de l'épaisseur du substrat, elles stockent une partie plus ou moins importante des eaux de pluie atteignant les toitures (le rôle des toitures végétales sur la gestion des eaux pluviales est développé dans la fiche aménagement de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal).

Le potentiel d'aménagement et l'impact des bâtiments végétalisés dépendent du type de quartier :

Les « grands ensembles » ont déjà des surfaces végétales importantes au sol mais les bâtiments élevés présentent des façades de grandes tailles et fortement exposées au soleil. La végétalisation des façades représente un enjeu important pour l'isolation et pour la diminution du stockage de chaleur dans la journée.

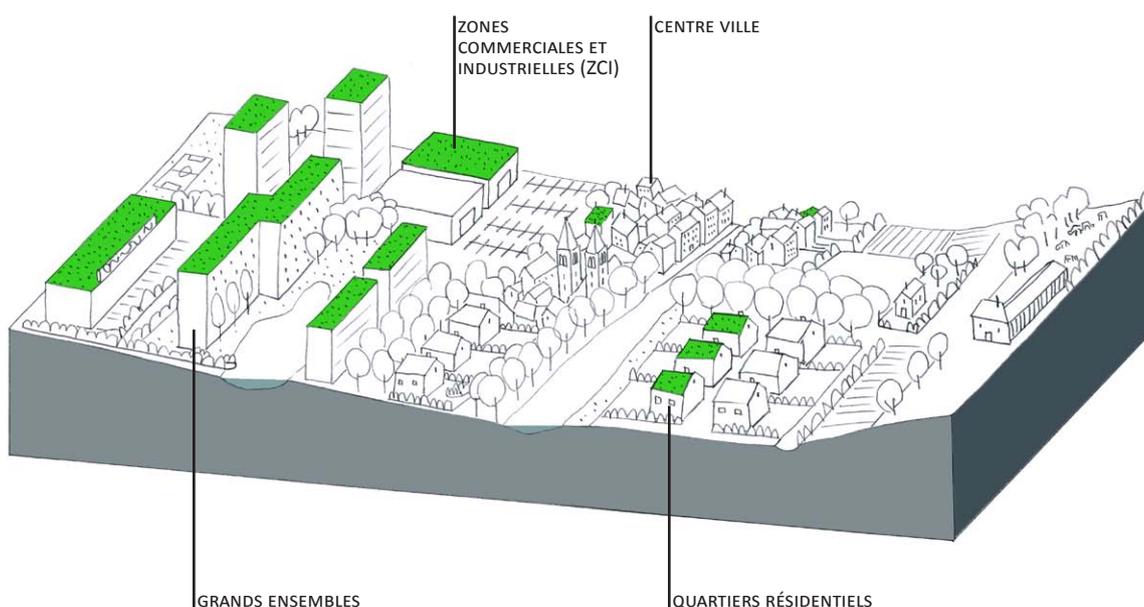
Les zones industrielles et commerciales ont en revanche de grandes surfaces de toit exploitables. L'avantage des toitures végétales pour ces quartiers peut être significatif car les bâtiments ont une proportion toiture / surface au sol importante.

Le centre-ville a les caractéristiques des deux quartiers précédents : bâtiments ayant une emprise au sol et une hauteur importante. Les toitures et surtout les façades végétales ont donc un rôle à jouer notamment dans la diminution du piégeage radiatif lié aux nombreuses rues canyons de ces quartiers.

Pour les quartiers résidentiels, des bénéfices sont possibles pour le confort intérieur et les consommations d'énergie des habitations les moins bien isolées.

Figure 16 :

Les toitures végétalisées à l'échelle de la ville



Résultats VegDUD

Impact des toitures végétalisées à l'échelle de la ville

• SIMULATION SUR LA VILLE DE NANTES POUR LA PÉRIODE DE MAI 2011 À SEPTEMBRE 2012

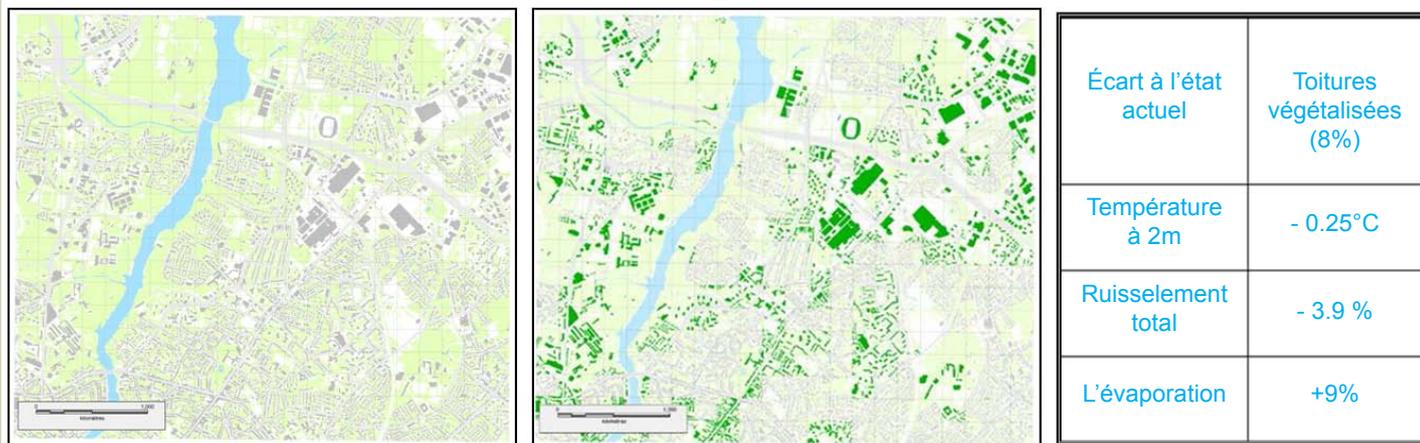


Figure 17 : Impact des toitures à l'échelle de la ville. Comparaison entre un état de référence (à gauche) et un scénario de végétalisation des toitures (en vert foncé), soit 50% des bâtiments selon le type : administratif et collectif (au milieu) en termes de température à 2m, de ruissellement total et d'évapotranspiration (à droite). Végétaliser la moitié des bâtiments sur le domaine étudié, revient à végétaliser 8% de la surface totale du domaine.

Dans cette modélisation, les toitures végétales ont un substrat de 15cm d'épaisseur. La température au sol n'évolue presque pas malgré une augmentation de 9% de l'évapotranspiration. Lors d'un évènement pluvieux, la toiture va stocker les premiers millimètres de pluie (diminution du volume ruisselé) jusqu'à saturation du substrat. Ici, pour 8% de la surface couverte par des toitures végétales le ruissellement diminue d'environ 4%.

• SIMULATION SUR L'IMPACT DES TOITURES VÉGÉTALES SUR LA VILLE DE PARIS

Dans ces simulations, le chauffage et la climatisation sont utilisés de façon raisonnée dans tous les bâtiments même pour le scénario de référence (végétation actuelle).

Sur 10 ans de simulation (1999-2008), par rapport à la situation de référence, les toitures végétalisées permettent d'économiser de l'énergie quelle que soit la saison. Les gains atteignent 23% (28% si les toitures sont arrosées) en été. En hiver, malgré un gain de consommation relatif plus faible (4,5%), les économies d'énergie correspondantes sont plus importantes.

Pour une canicule comme celle de 2003, la végétalisation des toitures permet de réduire de 4% la consommation d'énergie et si ces toitures sont arrosées la réduction atteint 12%.

En revanche, les toitures végétalisées, même irriguées, améliorent peu le confort thermique à l'extérieur.

> Résultats produits par l'IFSTTAR (Chancibault K., Allard A.) et MétéoFrance (Lemonsu A, De Munck C) avec le modèle de surface et d'hydrologie TEB. Les résultats sur la ville de paris sont issus de la thèse de De Munck C.

► FICHE 3 :

ARBRES

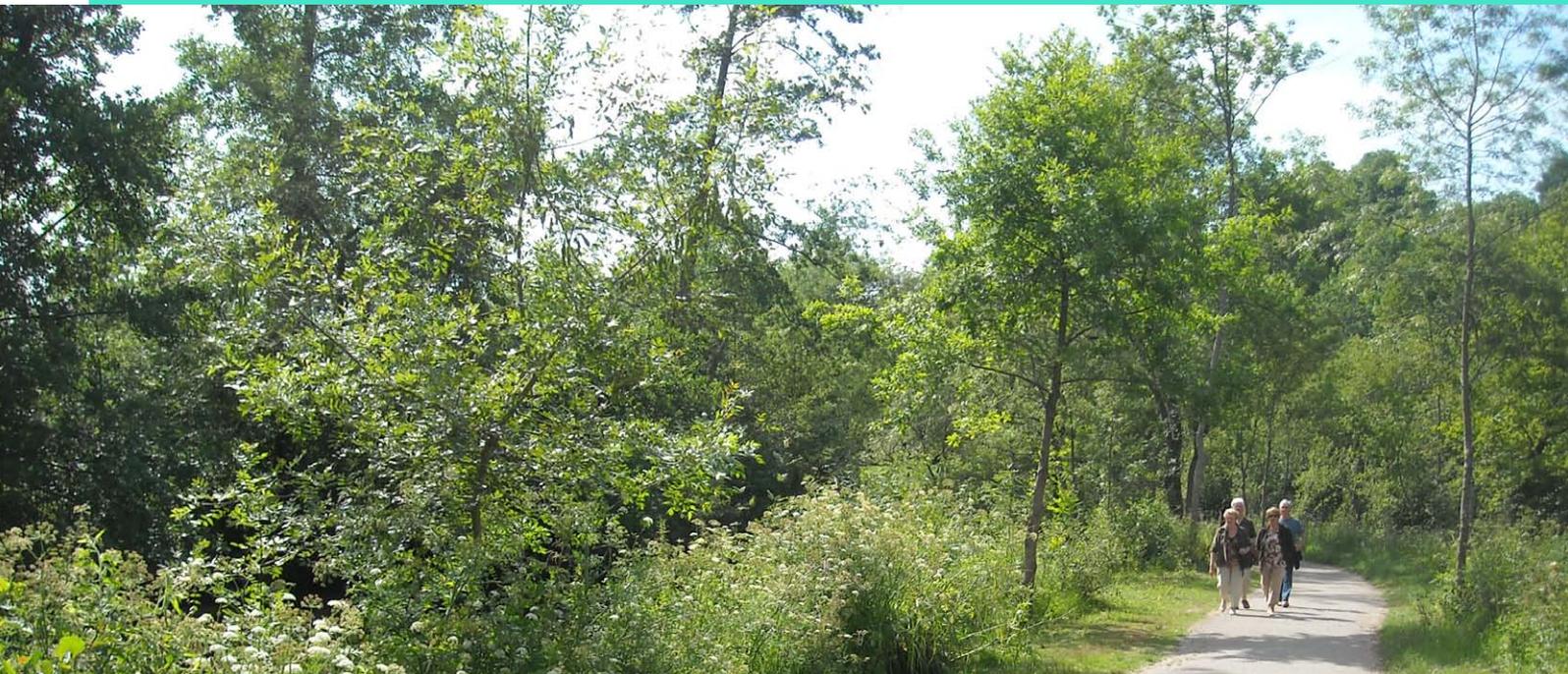


Photo n°28 : Promenade le long de l'Erdre, Nantes.

L'arbre en milieu urbain symbolise la diversité des enjeux sur la nature en ville : patrimonial, écologique, social, politique auxquels il faut ajouter les impacts sur le confort thermique (îlot de chaleur urbain) et sur les consommations d'énergie.

Les arbres se différencient suivant leurs espèces mais également selon plusieurs caractéristiques :

- la dimension des arbres (hauteur, largeur). On peut distinguer les arbres de petit développement (jusqu'à 5 mètres de haut), de moyen développement (de 5 à 20 mètres) et de grand développement (plus de 20 mètres),
- le port des arbres. On distinguera ici les ports érigés (fastigiés) et les ports non érigés (étalés). En effet cette distinction est importante car elle donne une information sur la largeur de la couronne,
- la persistance du feuillage, les arbres pouvant avoir un feuillage caduc ou persistant,
- le mode de gestion des arbres, en particulier les interventions de taille régulière sur les arbres (à ne pas confondre avec la taille de formation qui n'a lieu que pour les stades jeunes des arbres). On considèrera les tailles qui modifient le port de l'arbre formé, comme les tailles architecturées.

LES ARBRES EN VILLE

Des essences pionnières d'arbres peuvent se développer spontanément dans des délaissés urbains ou au sein de petits îlots boisés revêtant un caractère plus naturel.

D'autres essences sont spécifiquement choisies et plantées pour mailler la trame urbaine (alignement, square plantés, parcs et jardins, ...)

Certains arbres par leurs caractéristiques esthétiques et leur architecture, leur rareté botanique, leur âge et leurs liens avec le patrimoine culturel ou historique de la ville, revêtent une valeur patrimoniale, pédagogique et sociale majeure.

La densité et la forme des plantations amènent à distinguer les arbres d'alignement et la forêt urbaine.

ARBRES D'ALIGNEMENT

En milieu urbain, les arbres subissent des pressions particulières. Le milieu urbain est loin d'offrir des conditions favorables à la pérennité des plantations. Par exemple, les arbres d'alignement des voiries urbaines sont soumis à des nombreuses contraintes :

- conditions hydriques difficiles (imperméabilisation des surfaces, difficulté d'accéder à la nappe phréatique),
- état du sol (tassement, sécheresse, pauvreté organique),

- dommages mécaniques (chocs avec des voitures, travaux de voirie),
- contraintes climatiques (îlots de chaleur, réverbérations, pollutions atmosphériques).

Dans le cadre d'un projet d'aménagement urbain, au delà des enjeux d'esthétique et d'usage, le choix des espèces à planter doit donc tenir compte de ces contraintes, en plus des besoins en gestion et en entretien. Le désherbage chimique du pied des arbres n'est jamais anodin en termes de pollution et de santé des arbres (phytotoxicité). La végétalisation des pieds d'arbres constitue une solution alternative satisfaisante sur le plan esthétique et écologique.

LA FORÊT URBAINE

Le terme forêt urbaine est souvent utilisé pour désigner l'ensemble du patrimoine arboré d'une ville et la végétation qui lui est directement associée (pied d'arbre, parc). Cette notion est plutôt utilisée par les anglo-saxons mais elle a l'avantage de prendre en compte les arbres et leurs interactions au sein d'une ville. On raisonne ici la forêt urbaine comme une forme d'écosystème urbain avec ses fonctions et processus propres (biodiversité, régulation, usages...).

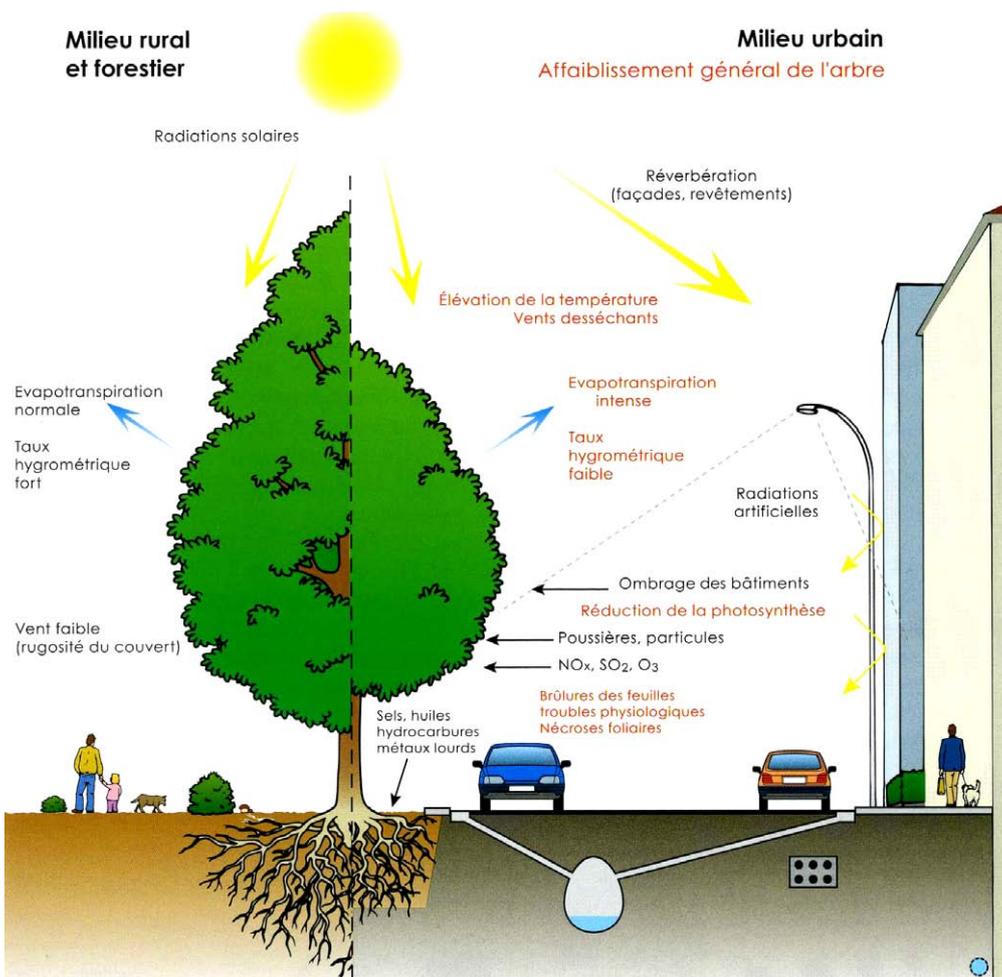


Figure 18 : Les incidences du micro-climat et de la pollution sur la végétation, d'après F. Freytet, in Arboriculture urbaine, 1993. Extrait de L'arbre en milieu urbain, Bourgerly et Gillig, 2008.



Photo n°29 : Arbres d'alignement, Angers.

CADRE RÉGLEMENTAIRE ET PROMOTION DE L'ARBRE URBAIN

Les outils de planification urbaines et règlements d'urbanisme permettent de mettre en place des mesures de protection des arbres. Dans certaines zones, les arbres sont protégés par des réglementations strictes. C'est le cas des Espaces Boisés Classés (EBC), des Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) etc.

La création d'une charte de l'arbre permet de définir la place et les objectifs de développement de la strate arborée par rapport aux grandes orientations stratégiques développées au niveau national comme local, concernant le concept de « villes durables ».

Par exemple, la charte partenariale de l'arbre du Grand Lyon s'insère avec cohérence dans le cadre législatif et stratégique en vigueur dans l'agglomération : des lois Grenelles 1 et 2 à l'Agenda 21 du Grand Lyon, en passant par les PADD de son SCOT et des PLU. Celle de Nantes définit des actions pour une protection efficace de l'arbre, vis-à-vis des pressions et contraintes urbaines.

« Le bon arbre, au bon endroit »

Huit principes pour créer, entretenir et partager le paysage arboré d'aujourd'hui et de demain (charte de l'arbre du grand Lyon) :

- la « diversité », un enjeu esthétique, écologique et culturel,
- la « permanence » pour un paysage attrayant tout au long de l'année,
- la « durée », ou comment faire du temps un allié,
- la « dynamique du paysage », ou comment intégrer une perpétuelle évolution,
- « l'économie », au centre des exigences pour la maîtrise des dépenses,
- la « pédagogie », pour une culture de l'arbre partagée,
- la « solidarité » ou comment véhiculer des valeurs essentielles à travers l'arbre,
- la « recherche et l'innovation » pour un meilleur avenir de l'arbre.

Source : <http://www.grandlyon.com/>

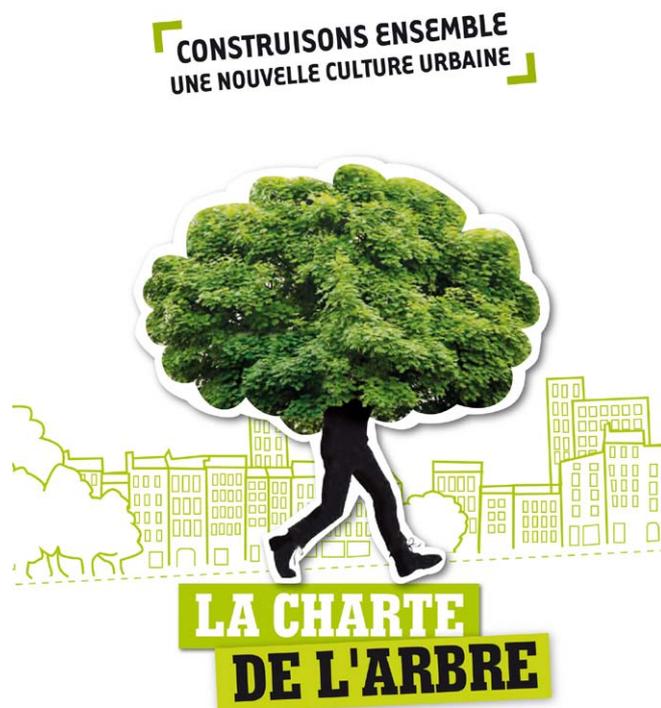


Figure 19 : La Charte de l'Arbre du Grand Lyon. **GRANDLYON** communauté urbaine

ÉVALUATION DES IMPACTS

ÉCHELLE :



Bâtiment / parcelle

ENJEUX :



- Confort extérieur
- Consommation d'énergie

Un arbre modifie son environnement :

- 1 Rayonnement net :** Le rayonnement solaire qui atteint la canopée va subir plusieurs processus : la partie interceptée par le feuillage est soit absorbée soit réfléchi (environ 30%). En fonction de la densité du feuillage, une partie sera également transmise. À l'ombre, les surfaces se réchauffent moins : l'arbre apporte une protection contre le rayonnement solaire direct.
- 2 Evapotranspiration :** La transpiration de l'arbre consomme une grande partie de l'énergie reçue par rayonnement solaire et évite la surchauffe du feuillage. Les racines des arbres adultes vont plus en profondeur que celles de la végétation de surface et accèdent ainsi à des ressources en eau plus importantes. Dans ces conditions, les arbres adultes sont moins sensibles au stress hydrique (phénomène de cavitation qui touche les arbres adultes).
- 3 Vent :** Les arbres offrent une protection contre le vent, ce qui réduit le renouvellement de l'air à proximité des surfaces et donc les échanges de chaleur et d'humidité entre celles-ci et l'air.

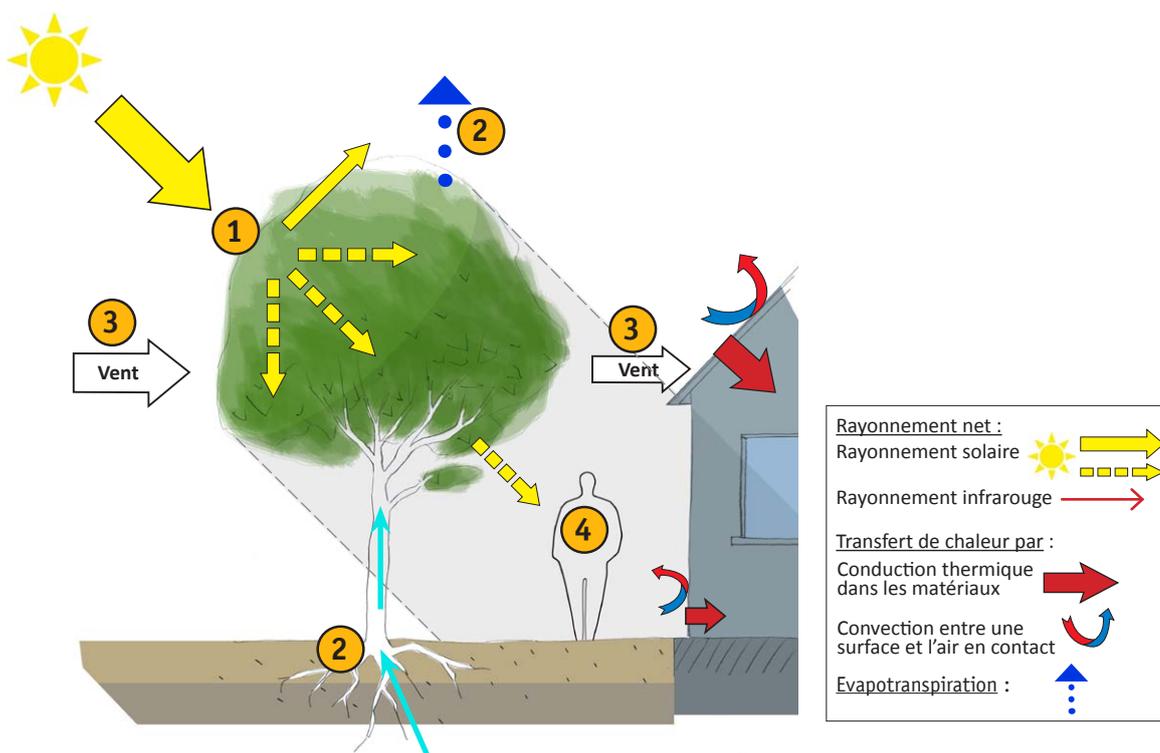
Et a un impact sur les enjeux :

Consommation d'énergie : Si un bâtiment profite de l'ombrage, moins d'énergie est transmise par conduction thermique (transfert de chaleur à travers les murs) ou par transmission à travers les vitrages. En période chaude, les consommations d'énergie pour la climatisation sont moins importantes. Si le feuillage persiste en hiver, cet avantage devient un inconvénient et entraîne une augmentation des consommations d'énergie. La diminution du vent au niveau des parois diminue les pertes de chaleur du bâtiment : c'est un avantage en hiver mais un inconvénient en été.

- 4 Confort :** En période estivale, l'ombrage d'un arbre permet une réelle amélioration du confort thermique en protégeant les individus du rayonnement solaire direct. C'est cet effet qui domine dans le cas d'un arbre isolé car l'effet de rafraîchissement de l'air n'est pas assez important pour avoir un impact sur le confort. Pour les arbres à feuilles caduques, en hiver il ne reste que les branches : les effets d'ombrage et de réduction du vent seront donc beaucoup moins importants. En contre-partie, le rayonnement solaire qui passe à travers les branches peut réchauffer les bâtiments.

Figure 20 :

Influence d'un arbre seul sur son environnement



ÉVALUATION DES IMPACTS

ÉCHELLE :



Rue (arbres d'alignement)

ENJEUX :



- Confort dans la rue et dans les bâtiments
- Consommation d'énergie

La géométrie urbaine représente un piège radiatif. Les scientifiques ont démontré que les arbres d'alignement diminuent les effets du piégeage radiatif dans le cas le plus représentatif d'une rue canyon symétrique :

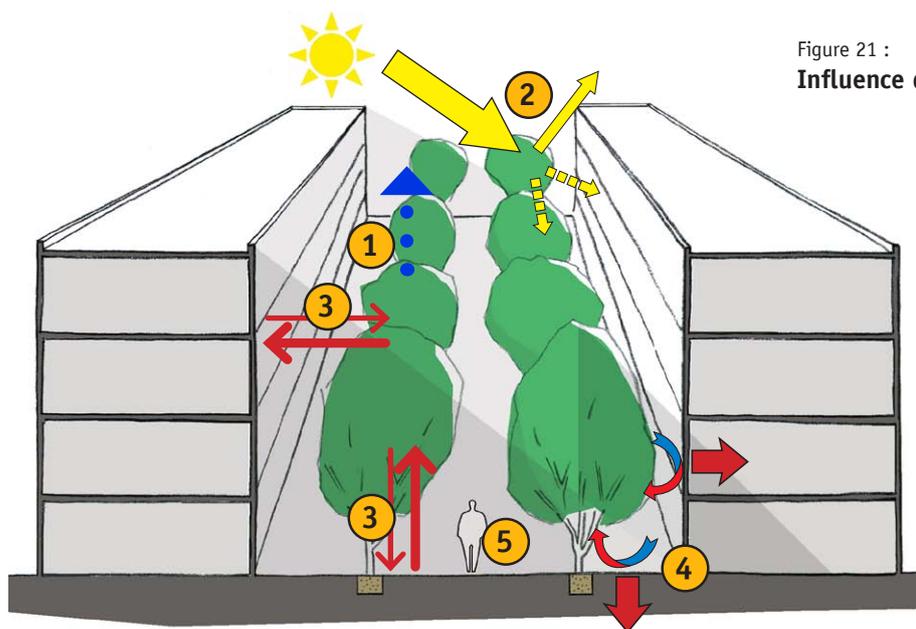
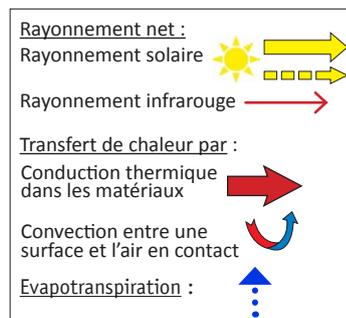


Figure 21 :

Influence des arbres d'alignement dans une rue canyon



1 Evapotranspiration : L'énergie correspondant au rayonnement intercepté par le feuillage est en partie utilisée pour l'évaporation. Celle-ci rafraîchit l'air ambiant et augmente son humidité. Elle permet également au feuillage de rester à une température proche de celle de l'air.

2 Rayonnement net : Le rayonnement solaire intercepté et réfléchi par les arbres en direction du ciel ne participe pas au réchauffement de la rue. Ils ombrent également des surfaces qui si elles étaient exposées atteindraient des températures élevées et émettraient un rayonnement infrarouge plus énergétique.

3 Le feuillage intercepte également le rayonnement infrarouge limitant ainsi les échanges de chaleur entre les différentes surfaces (façades et rue), et les pertes de chaleur de la rue (rayonnement émis en direction du ciel).
En période estivale, les arbres et en particulier leurs houppiers sont des surfaces radiatives « fraîches » par rapport aux surfaces urbaines minérales. Ainsi, les échanges entre la canopée et les éléments de la rue (façades et sol) contribuent à diminuer les températures des surfaces.

4 Conduction / convection : Par rapport à une rue sans végétation, les surfaces se réchauffent moins et donc :
- réchauffent moins l'air de la rue par convection thermique,

- limitent le stockage de chaleur dans les matériaux pendant la journée.

Vent : La vitesse du vent dans la rue est limitée par sa configuration et les arbres limitent encore plus cette vitesse. L'air se renouvelle difficilement.

Cette diminution du piégeage radiatif a un impact sur le confort thermique et sur les consommations d'énergie :

5 Confort : en période estivale, la participation des arbres au confort thermique des citoyens est importante :
- dans la rue, l'ombrage des arbres évite aux passants d'être directement exposés au rayonnement solaire,
- la diminution des températures de surface, l'augmentation de l'humidité liée à l'évapotranspiration et la diminution du vent jouent sur le confort thermique.

Consommation d'énergie : Les consommations d'énergie pour la climatisation des bâtiments sont diminuées car en plus de l'effet direct de l'ombrage (moins de chaleur transmise par conduction), les bâtiments profitent de l'air plus frais de la rue.

Résultat VegDUD

Influence des arbres d'alignement sur le confort dans la rue

SCÉNARIO :

Le confort thermique est évalué dans la rue, à 16h et pour les conditions météorologiques du 8 juillet 2010 sur Nantes. De nombreuses configurations ont été évaluées : différentes orientations de la rue (Nord Sud, Est Ouest, et Nord-est Sud-ouest) et hauteurs (H) et largeur (L) de rue : H et L = 14 m, H = 21 m et L = 14 m, H et L = 21 m). La configuration de référence est une rue complètement minérale et le scénario végétalisé représente une rue avec deux alignements d'arbres de 9m de haut. Les arbres ne manquent pas d'eau : l'évapotranspiration est donc maximale.

RÉSULTATS :

Pour l'ensemble des scénarios, les arbres d'alignement permettent de diminuer la température de l'air de quelques degrés. Par contre pour les surfaces, la diminution des températures à l'ombre peut dépasser les 10°C et ainsi améliorer significativement le confort dans la rue.

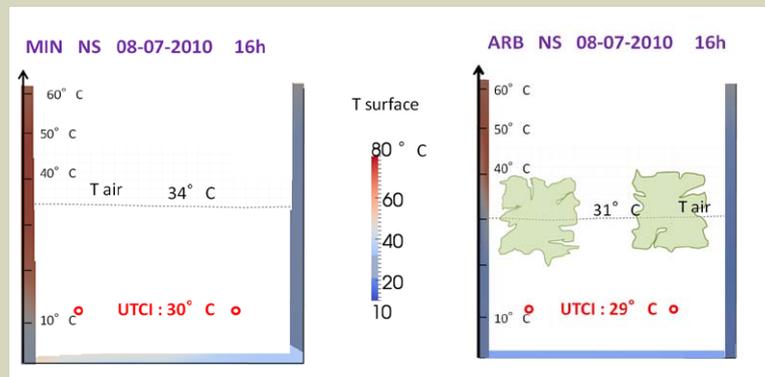


Figure 22: Évolution des conditions dans une rue entre le cas sans végétation (à gauche) et le cas avec des arbres d'alignement (à droite). La rue est large de 14m et haute de 21m, elle est orientée Est Ouest. L'UTCI* représente la température ressentie pour un passant (calculé pour une humidité de 50% et un vent de 0.9m/s), Tair est la température de l'air à 2m au dessus du sol, MRT est la température radiante moyenne au niveau du sol.

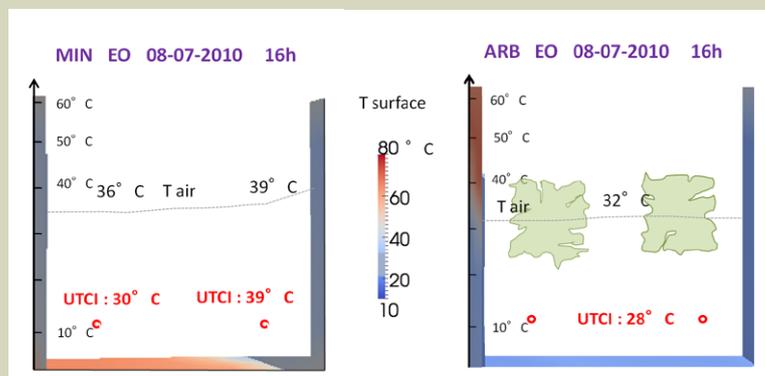


Figure 23 : Évolution des conditions dans une rue entre le cas sans végétation (à gauche) et le cas avec des arbres d'alignement (à droite). La rue est large de 21m et haute de 21m, elle est orientée Nord Sud. L'UTCI* représente la température ressentie pour un passant (calculé pour une humidité de 50% et un vent de 0.9m/s), Tair est la température de l'air à 2m au dessus du sol, MRT est la température radiante moyenne au niveau du sol.

Pour la rue orientée Est Ouest (Figure 23), les arbres d'alignement permettent de diminuer l'UTCI* et d'obtenir des conditions correspondantes à un stress thermique modéré (à droite). La partie supérieure du bâtiment de droite n'est pas protégée par les arbres, elle se réchauffe plus que la partie inférieure : ces besoins énergétiques pour la climatisation sont plus importants.

*UTCI : l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) permet de prendre en compte ces facteurs et de donner une indication sur le confort thermique du passant, (cf chapitre Les clés pour comprendre).

> Résultats produits par le CERMA (Szucs A., Musy M.) avec le modèle : Solene-microclimat

La configuration de l'alignement détermine l'importance des effets :

- des houppiers continus créent un effet d'écran qui maximise l'ombrage et la diminution du vent dans la rue,
- l'exposition et la distance par rapport aux façades influencent les consommations d'énergie et le confort dans la rue. Plus les arbres protègent les façades, moins le passant reçoit de rayonnement solaire réfléchi et de rayonnement infrarouge en provenance de celles-ci. De même, les façades interagissent moins entre elles.

Pour optimiser la régulation thermique liée aux arbres d'alignement, ces résultats démontrent qu'il peut être intéressant de raisonner l'aménagement des rues de façon non symétrique en prenant en compte leur orientation.

ÉVALUATION DES IMPACTS

ÉCHELLE :



ENJEUX :



- Ilot de chaleur urbain
- Confort thermique
- Consommation d'énergie
- Carbone

Les arbres ont un impact sur l'îlot de chaleur urbain car :

- ils favorisent le flux de chaleur latente (l'évapotranspiration) au détriment du flux de chaleur sensible (convection). L'air en ville se réchauffe donc moins,
- la protection des bâtiments contre le réchauffement lié au rayonnement solaire (effet d'ombrage) et la diminution de l'effet de piège radiatif que représentent les rues canyons, limitent le stockage de chaleur dans les matériaux (bâtiment, voirie, ...) pendant la journée. La ville dégage donc moins de chaleur la nuit et la température de l'air diminue plus vite.

Dans les parcs ou les cœurs d'îlot, la présence de bois ou de forêt modifie de façon significative la température de l'air et peut avoir une influence sur les zones adjacentes en rafraîchissant les quartiers sous le vent. Ces parcs sont des îlots de fraîcheur et représentent un refuge pour les habitants lors des périodes chaudes.

La diminution de température lors de périodes chaudes, même si elle est faible, peut apporter une diminution importante des consommations d'énergie pour la climatisation des bâtiments.

En plus des enjeux thermique et climatique, la forêt urbaine à l'échelle de la ville est le principal puits de Carbone. L'arbre est donc un levier majeur dans une politique énergétique qui intègre autant le confort thermique que les gaz à effet de serre.

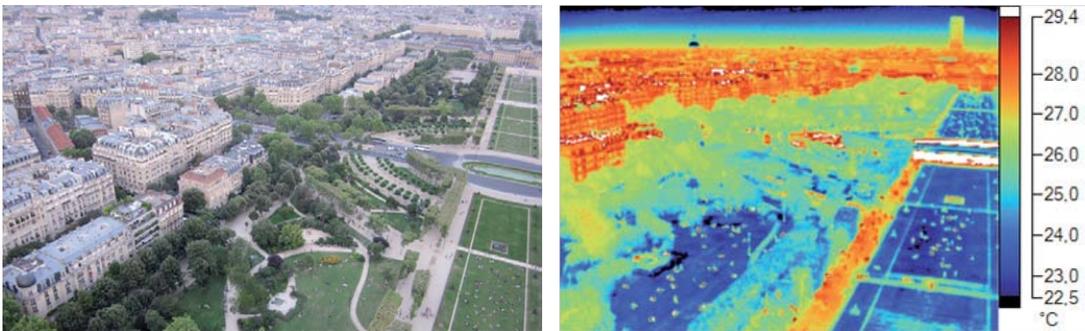


Figure 24 : Thermographie d'un parc urbain (Source APUR 2011). Vues aériennes du Champs-de-Mars prises le 2 août 2011 vers 20h (18 UTC) peu après le coucher du soleil.

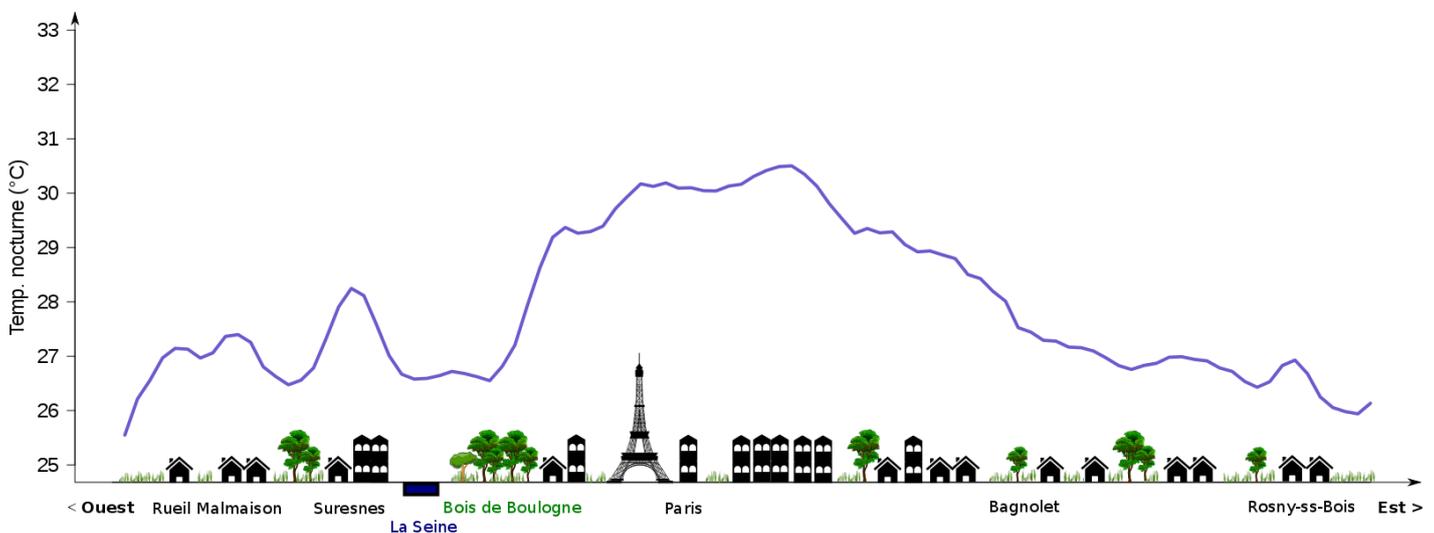


Figure 25 : Ilot de chaleur urbain (Paris, canicule 2003). Source: de Munck et al. (2013) Int. Jour. Climatol.

Résultat VegDUD

Impact des arbres sur les températures dans Paris

SCÉNARIO :

Verdissement de 25%, de 50% et de 75% des surfaces disponibles (trottoirs, parkings, places, ronds-points etc.), soit une augmentation de la végétation urbaine de 11%, 22% et 34%. Le verdissement se partage entre arbres caducs (40%) et pelouse (60%).

Dans ces modélisations, la végétation est arrosée durant la nuit. Elle n'est pas soumise au stress hydrique : l'évapotranspiration est donc optimisée.

RÉSULTATS :

- Pour les 6 jours de canicule de 2003 :

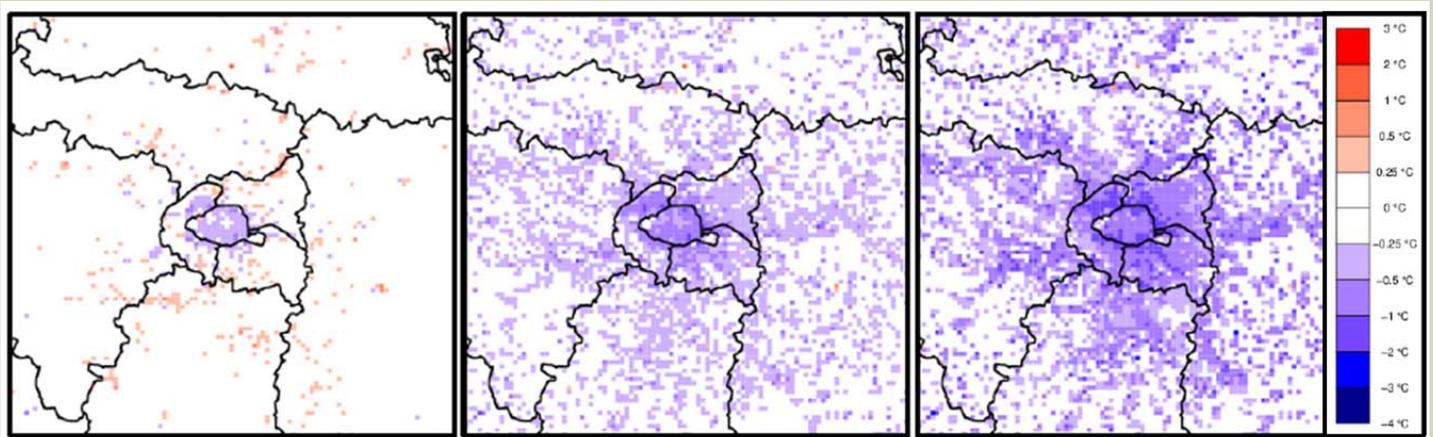


Figure 26 : Impact des arbres sur les températures. Diminution des températures maximales pour les différents scénarios de verdissement sur les 6 jours de la canicule de 2003 pour un verdissement de 25% (à gauche), de 50% (au milieu) et de 75% (à droite) des surfaces disponibles.

La diminution des températures induit une diminution des consommations d'énergie pour la climatisation (température de consigne de 26°C) de 8%, 10% et 13%. Le scénario le plus vert, permet de diminuer d'une heure par jour les conditions de stress thermique très élevé (UTCI supérieur à 38°C).

Ce scénario de verdissement mettant en oeuvre un arrosage toutes les nuits engendre des consommations d'eau très importantes.

- Sur 10 ans de simulation (1999-2008) :

Les arbres engendrent une augmentation des consommations d'énergie sauf l'été où ils permettent une légère diminution. Il faut également remarquer que leur effet d'ombrage n'est pas pris en compte, seul l'effet d'évapotranspiration l'est.

Cependant, ce résultat est très lié au scénario modélisé car dans les pratiques de gestion actuelles, les arbres adultes ne sont jamais arrosés (sauf les plus jeunes pour qu'ils survivent à la transplantation).

> Résultats produits par Météo France (de Munck C, Lemonsu A) avec le modèle de surface TEB

► FICHE 4 :

SURFACES ENHERBÉES / SURFACES SANS COUVERT VÉGÉTAL



Photo n°30 : Parc balzac, Angers.

Les surfaces d'espaces verts urbains et périurbains ont connu ces dernières décennies une forte augmentation en lien avec l'urbanisation et l'étalement des villes. Les attentes et les usages des habitants vis-à-vis de ces espaces sont divers : symboles de nature, aires de loisirs, régulateurs thermiques, patrimoines paysagers, etc.

Les enjeux environnementaux des surfaces enherbées sont importants car elles représentent des surfaces considérables.

TYPLOGIE DES SURFACES ENHERBÉES

Dans le cadre de la mise en place de plans de gestion différenciée, les gestionnaires fixent des classes d'entretien correspondant à des objectifs d'usage, de fonction écologique, d'esthétique et d'ambiance.

On définira ici cette forme de végétation par une végétation herbacée sur sol perméable gérée de manière plus ou moins intensive en association ou non avec des strates arborées et arbustives.

Cette végétation herbacée se rencontre sous diverses formes en fonction des usages suivant le type d'espace :

LES PARCS DE PRESTIGE AVEC UNE GESTION HORTICOLE

Ce type de parc se trouve le plus fréquemment en centre ville et véhicule une image de marque pour la ville. Ici, l'aménagement est très structuré et un soin particulier est apporté aux pelouses (tonte régulière avec ramassage de l'herbe, fertilisation, arrosage).

LES COUVERTS FLEURIS : en plein essor dans les espaces verts, ils demandent peu d'entretien et s'inscrivent dans la recherche d'une gestion extensive. Des mélanges associant graminées, vivaces, annuelles et bisannuelles sont semés avec fauche annuelle au printemps ou à l'automne. Dans un but ornemental, les mélanges utilisés en ville s'appuient principalement sur des espèces horticoles ressemées chaque année ou tous les deux ans. Communément appelés « prairies fleuries » par les gestionnaires, cette végétation est utilisée dans des situations diverses : ronds-points, accotements de voiries, pieds d'arbres, jardins, talus. Ces couverts fleuris représentent également une alternative aux pelouses classiques en termes d'entretien en limitant les tontes. La durée des mélanges est cependant variable.

LES PRAIRIES URBAINES, présentes dans les parcs et espaces naturels aménagés. Elles sont gérées de façon extensive, elles sont fauchées une fois par an. Dans ces espaces, l'aménagement de vastes espaces et l'entretien des chemins permettent de répondre aux diverses attentes et usages des habitants.

LES LISIÈRES, ou ourlets, souvent utilisées dans les espaces où la gestion extensive est privilégiée. Elles représentent un stade de transition entre la strate herbacée et la strate arbustive. Elles permettent de favoriser la biodiversité en servant de refuge à la faune et la flore.



Photo n°31 : Prairie fauchée, Culemborg, Pays-Bas. / Photo n°32 : Surface enherbée, ZAC Desjardins, Angers. / Photo n°33 : Surface enherbée hors sol, tram, Marseille.

GESTION

La gestion différenciée des espaces verts fait appel à de nouvelles formes de végétalisation. Celles-ci cherchent à prendre en compte à la fois l'esthétisme, la biodiversité, l'environnement, le niveau de fréquentation du public et les contraintes économiques.

Incités par les objectifs du plan Ecophyto 2018, les gestionnaires recherchent à remplacer ou à réduire l'utilisation de produits phytosanitaires. Les autres méthodes de désherbage, qu'elles soient thermiques, mécaniques ou manuelles, soulèvent des problématiques économiques et environnementales. Des espaces qui étaient désherbés régulièrement sont réaménagés en fonction d'objectifs de gestion minimisant les intrants et les interventions.

Dans certains cas, le recours à la végétalisation peut être une technique préventive intéressante : il s'agit d'implanter de la végétation sur des surfaces perméables autrefois désherbées (surfaces sablées, stabilisé, sol nu), afin d'empêcher la colonisation de ces surfaces par la flore adventice.

Cette végétalisation peut se faire de façon naturelle ou à partir d'un ensemencement initial.

La mise en place de principes de gestion différenciée sur les espaces verts urbains, la réduction des intrants et de l'arrosage ainsi que la diminution de l'utilisation de produits phytosanitaires amène les gestionnaires à modifier leurs objectifs vis-à-vis de la flore spontanée qui moins contrôlée prend naturellement une place plus importante dans les espaces qu'on lui laisse.

Gestionnaires et concepteurs paysagistes cherchent à accompagner cette évolution en aménageant des espaces adaptés à ces nouvelles contraintes et en accompagnant la nature en ville plutôt qu'en luttant contre cette dynamique. Ce changement d'esthétique de l'espace public nécessite d'être accompagné de communication et d'actions de sensibilisation adaptées aux différents publics. Les services et les bienfaits apportés par ces espaces contribuent à les valoriser.



Photo n°34 : Gestion différenciée, Culemborg, Pays-Bas. / Photo n°35 : Gestion différenciée, prairie fauchée, Parc Balzac, Angers. / Photo n°36 : Parc de la Cité Radieuse, Rezé. / Photos n°37, 38, 39 : Trottoirs sablés et stabilisés enherbés, Nantes, Paris, Versailles.

ÉVALUATION DES IMPACTS

ÉCHELLE :



Bâtiment / parcelle

ENJEUX :



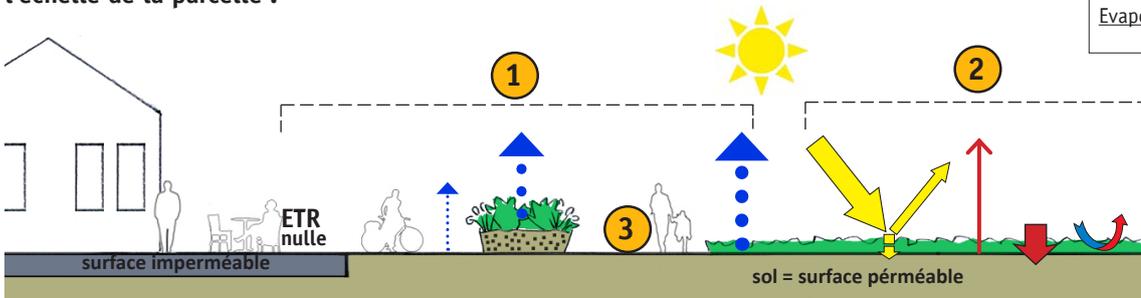
- Confort extérieur
- Infiltration

Vis-à-vis des enjeux de climatologie urbaine, une surface enherbée se distingue des autres surfaces urbaines par sa capacité :

- à dissiper de l'énergie par évapotranspiration (évaporation au niveau du sol et transpiration des plantes),
- à favoriser l'infiltration.

Figure 27 :

Influence des couverts enherbés sur l'hydrologie et le confort à l'échelle de la parcelle :



1 Évapotranspiration : L'évapotranspiration est nulle au-dessus d'une surface imperméable (excepté, après un épisode pluvieux, le temps qu'elle sèche). Pour les surfaces enherbées, elle est plus importante que pour les surfaces perméables non végétalisées car la transpiration des plantes crée une aspiration au niveau des racines et favorise les mouvements ascendants de l'eau dans le sol. Pour les systèmes de végétation hors-sol, la quantité d'eau disponible pour l'évapotranspiration dépend de l'épaisseur du substrat. L'apport d'eau par arrosage permet de toujours avoir une évapotranspiration importante.

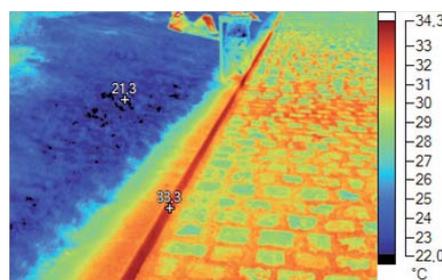
2 Rayonnement net : Environ 30% du rayonnement solaire incident est directement réfléchi par les surfaces enherbées vers le ciel et le reste est absorbé. Grâce à l'évapotranspiration, ces surfaces se réchauffent beaucoup moins sous l'effet du rayonnement solaire que des surfaces sans végétation et donc :

- elles émettent moins de rayonnement infrarouge,
- elles réchauffent moins l'air par convection thermique (l'effet sur les températures de l'air dépend de l'étendue de la surface, du vent, ...),
- elles limitent le stockage de chaleur dans le sol par conduction.

3 Confort : Un sol enherbé ne modifie pas beaucoup le confort thermique dans un espace dégagé car l'effet sur la température de l'air est à peine perceptible et la contribution du rayonnement solaire et trop importante pour que la diminution du rayonnement infrarouge en provenance du sol fasse une différence. Pour une personne allongée, la fraîcheur de la surface enherbée est appréciable en période estivale. Cependant, la plus grande exposition au rayonnement solaire et la diminution du vent au niveau du sol vont avoir l'effet inverse : augmentation du stress thermique.



Figure 28 : Thermographie surface enherbée (Source APUR 2011). Par rapport aux surfaces minérales à proximité les surfaces enherbées ont une température bien inférieure.



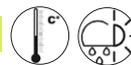
ÉVALUATION DES IMPACTS

ÉCHELLE :



Bâtiment / parcelle

ENJEUX :

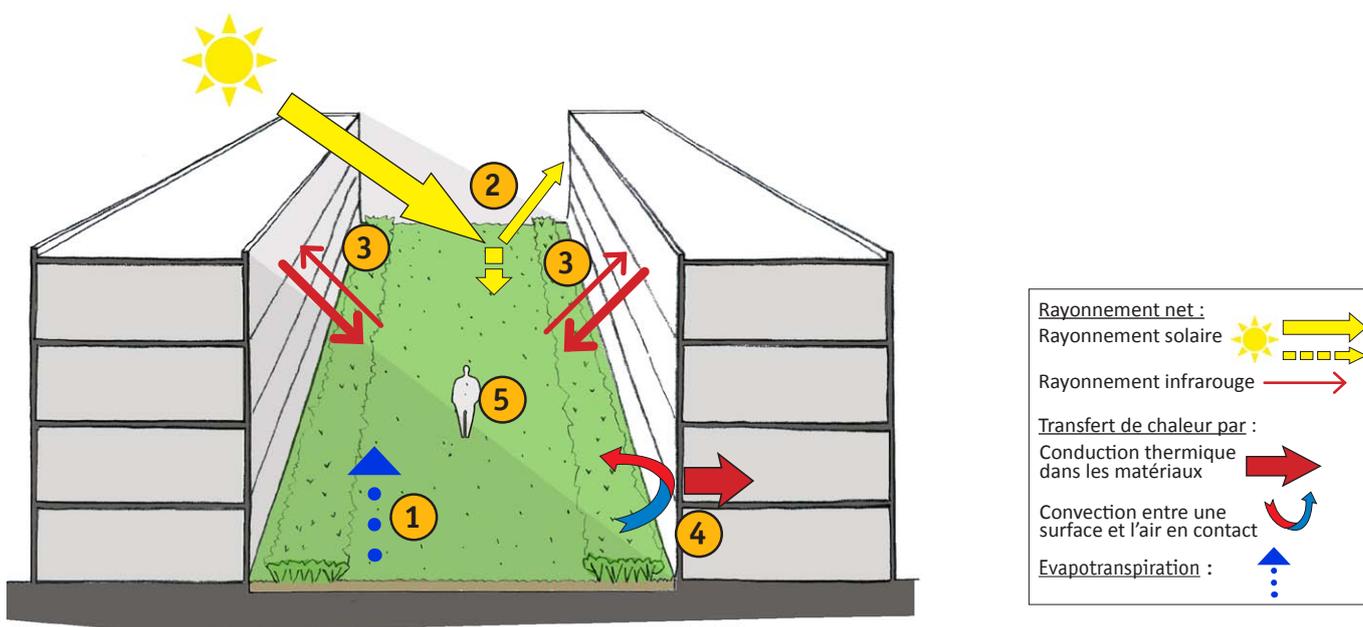


- Confort thermique
- Consommation d'énergie
- Climatologie urbaine

Dans la rue (ou dans un cœur d'îlot), en plus d'avoir les mêmes effets que pour une surface, l'enherbement va modifier les effets du piégeage radiatif :

Figure 29 :

Influence d'une surface enherbée dans une rue canyon



- 1 **Evapotranspiration** : Une grande partie de l'énergie correspondant au rayonnement absorbé par la surface enherbée est utilisée pour l'évapotranspiration ce qui permet au sol de rester à une température proche de celle de l'air.
- 2 **Rayonnement** : L'albédo de la végétation est d'environ 0,3 donc elle absorbe 70% du rayonnement solaire qu'elle reçoit. Ainsi, peu de rayonnement solaire est réfléchi depuis les surfaces enherbées vers les façades des bâtiments. Cependant, c'est aussi le cas pour les surfaces habituellement rencontrées dans une rue.
- 3 Les surfaces enherbées étant moins chaudes que les surfaces artificielles, elles émettent moins de rayonnement infrarouge. Les échanges de chaleur par rayonnement infrarouge entre les façades et les sols enherbés favorisent une diminution de la température des façades.
- 4 **Convection/conduction** : Cette diminution de la température des façades va à son tour limiter :
 - l'augmentation de la température de l'air par convection,
 - le réchauffement des bâtiments par conduction thermique.
- 5 **Confort** : Par rapport à une rue sans végétation, la surface enherbée améliore le confort dans la rue, en diminuant la température de l'air et les émissions d'infrarouge depuis le sol et les façades.

Consommation d'énergie : L'intérieur des bâtiments se réchauffe moins et la charge liée à la ventilation est également plus faible puisque l'air dans la rue est moins chaud, donc les consommations d'énergie pour la climatisation sont réduites.

Résultat VegDUD

Influence des surfaces enherbées sur le confort dans la rue

SCÉNARIO :

Influence des surfaces enherbées sur le confort dans la rue.

RÉSULTATS :

De façon générale, le bénéfice augmente avec l'exposition du sol au rayonnement solaire direct. Par exemple pour les rues orientées Nord Sud, à 16h le soleil n'atteint pas le fond de la rue et l'effet sur la température ressentie (UTCI) est faible : amélioration maximum de 2°C pour la rue avec les bâtiments les moins hauts (H = 14m).

Par contre, quand le rayonnement solaire atteint directement le fond de la rue (cas des rues orientées Est Ouest et Nord-est Sud-ouest) l'effet devient important. Il est d'autant plus intéressant que la rue est encaissée. La diminution de l'UTCI peut atteindre 14°C ; dans la rue végétalisée, le passant subira un stress thermique modéré alors que celui dans la rue sans végétation subira un stress thermique très élevé (Figure 30). Il est aussi intéressant d'observer que la diminution des températures de surface des façades peut atteindre 10°C et concerne l'ensemble des murs des bâtiments. Cette diminution des températures de surface aura un impact sur les consommations d'énergie pour la climatisation des bâtiments. Le sol, sous la végétation, reste à des températures basses : il n'y a pas de stockage de chaleur au niveau de la surface enherbée.

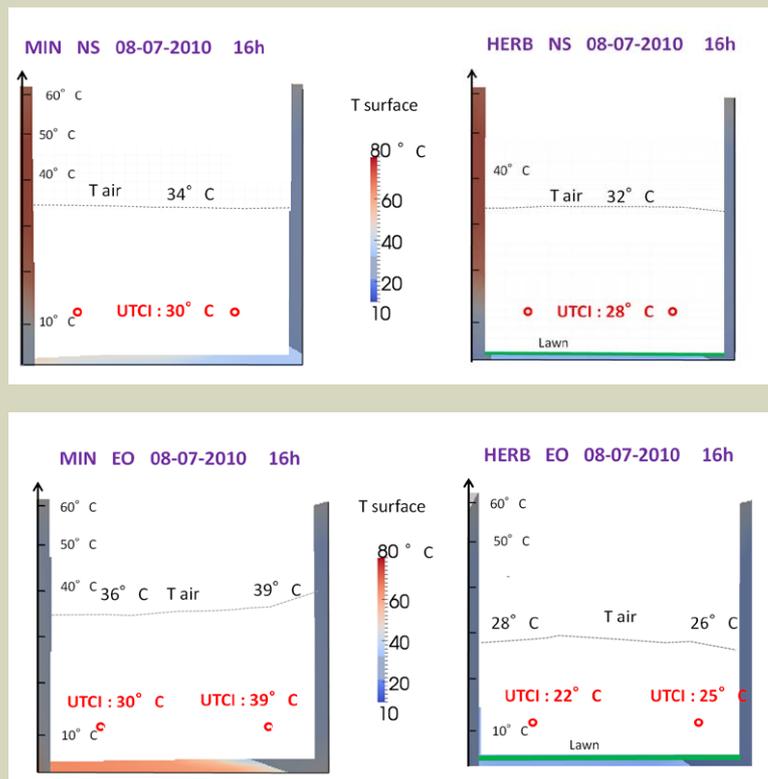


Figure 30 : Évolution des conditions dans une rue entre le cas sans végétation (à gauche) et le cas où le sol est entièrement végétalisé (à droite). La rue est large de 14m et haute de 21m.

Elle est orientée Nord Sud (en haut) et Est Ouest (en bas). L'UTCI représente la température ressentie pour un passant (calculé pour une humidité de 50% et un vent de 0.9m/s), T air est la température de l'air à 2m au dessus du sol, MRT est la température radiante moyenne au niveau du sol.

> Résultats produits par le CERMA (Szucs A., Malys L. et al.) avec le modèle Solene-Microclimat

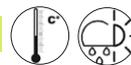
ÉVALUATION DES IMPACTS

ÉCHELLE :



Ville

ENJEUX :



- Ilot de chaleur urbaine
- Confort thermique
- Consommation d'énergie

Le remplacement de surfaces artificielles ou sans végétation par des surfaces enherbées permet d'avoir une influence sur les causes de l'îlot de chaleur urbain en :

- favorisant le flux de chaleur latente (échange d'énergie sous forme de vapeur d'eau) au détriment du flux de chaleur sensible (échange d'énergie sous forme de chaleur). L'air en ville se réchauffe donc moins,
- limitant le stockage de chaleur dans les matériaux par conduction que ce soit directement dans le sol ou la voirie ou indirectement dans les bâtiments en diminuant le piégeage radiatif. La ville en stockant moins de chaleur pendant la journée, connaît des températures moins élevées la nuit.

Cependant, si l'eau vient à manquer, l'évapotranspiration diminue ainsi que l'ensemble des bénéfices qui en découlent (amélioration du confort extérieur, diminution des consommations d'énergie, ...).

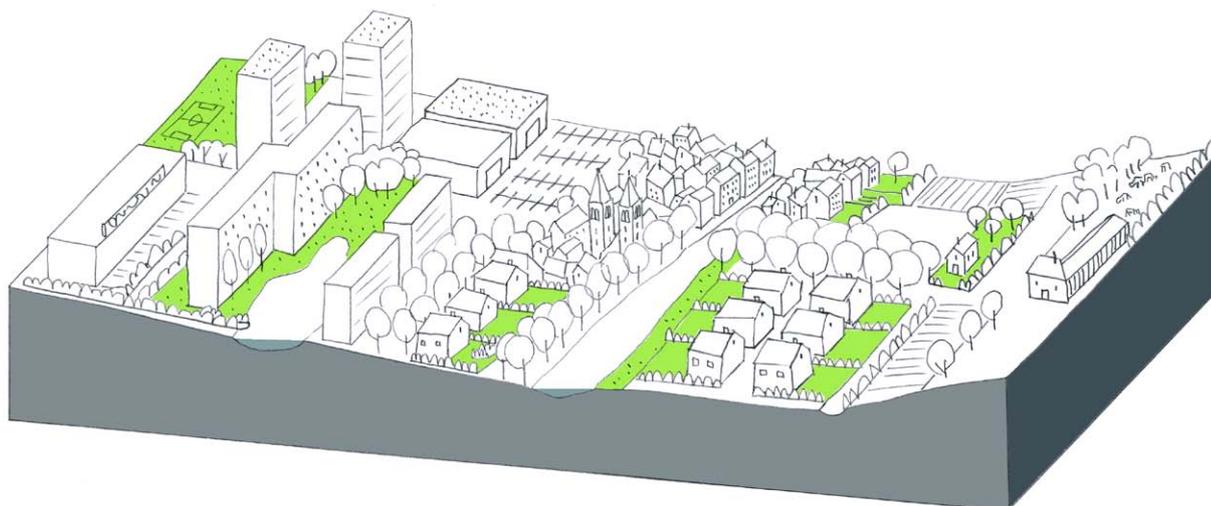
À l'échelle de la ville, une légère diminution des températures lors des périodes chaudes :

- peut apporter une diminution importante des consommations d'énergie pour la climatisation des bâtiments,
- n'a que peu d'influence sur le confort thermique extérieur par rapport aux paramètres locaux : vent, température radiante moyenne.

Les surfaces enherbées de pleine terre favorisent l'infiltration de l'eau de pluie et son stockage dans le sol. Cette eau est peut-être disponible pour l'évapotranspiration et elle n'a pas besoin d'être évacuée par le réseau d'eau pluviale. De plus, de façon générale la végétation intercepte une plus grande quantité d'eau de pluie que des surfaces minérales. Les surfaces enherbées permettent donc de diminuer les volumes et les vitesses des eaux de ruissellement (voir fiche gestion des eaux pluviales).

Figure 31 :

Les surfaces enherbées à l'échelle de la ville :



Résultat VegDUD

Impact de la végétation basse dans Paris

SCÉNARIO :

Verdissement par de la pelouse de 25% (V+), de 50% (V++) et de 75% (V+++) des surfaces disponibles (trottoirs, parkings, places, ronds-points etc.) soit une augmentation de la végétation urbaine de 11%, 22% et 34%. Dans ces modélisations, la végétation est arrosée durant la nuit. Elle n'est pas soumise au stress hydrique : l'évapotranspiration est donc optimisée.

RÉSULTATS :

- Pour les 6 jours de canicule de 2003 :

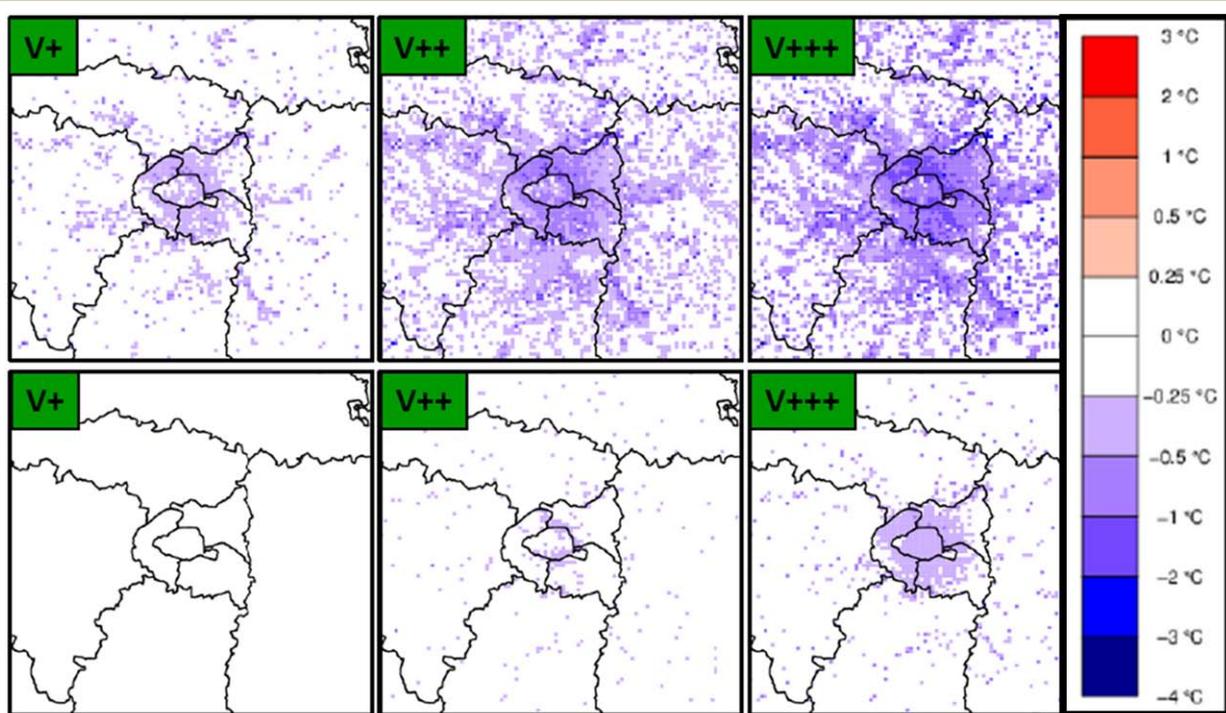


Figure 32 : Impact des surfaces enherbées sur les températures. Diminution des températures maximales (en haut) et minimales (en bas) pour les différents scénarios de verdissement sur les 6 jours de la canicule de 2003.

La diminution des températures induit une diminution des consommations d'énergie de climatisation (température de consigne de 26°C) de 2%, 5% et 7%. Le scénario V+++, permet de diminuer d'une heure par jour les conditions de stress thermique très élevé (température ressentie par le passant supérieur à 38°C).

Ce verdissement engendre des consommations d'eau très importantes. Par exemple, pour le scénario V+++, la consommation d'eau correspond à environ 70% du débit d'étiage de la Seine.

- Sur 10 ans de simulation (1999-2008) :

Le verdissement n'engendre pas d'augmentation des consommations d'énergie quelque soit la saison. Pour l'été, le scénario V+++ permet de les diminuer de 7,2%.

Pour les scénarios V++ et V+++, l'eau ruisselée sur la zone d'étude est inférieure au besoin de la végétation. Donc, le stockage de l'intégralité des eaux ruisselées ne suffit pas à couvrir les besoins de la végétation.

Rappel : dans ces modélisations, l'irrigation permet d'optimiser le processus d'évapotranspiration. En pratique l'irrigation des surfaces enherbées est rarement aussi importante.

> Résultats produits par Météo France (de Munck C, Lemonsu A) avec le modèle de surface TEB

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les fiches présentées dans cette synthèse apportent des connaissances fondamentales aux acteurs sur les interactions entre le végétal et le climat dans la ville. Rendre accessible aux néophytes des phénomènes complexes reste un exercice difficile pour les scientifiques formés à la rigueur des protocoles et des analyses. Des schémas rapides à lire, complétés de résultats de modélisations contextualisées, les clés de lecture par échelles et dispositifs emboîtés démontrent l'importance du raisonnement proposé par les disciplines réunies autour du programme de recherche VegDUD.

Les résultats de VegDUD restent toutefois difficiles à transposer. En effet, il a été mis en évidence dans l'état de l'art que le fonctionnement du végétal, système vivant, dépend d'un très grand nombre de facteurs fortement variables en ville. De nombreuses interrelations ont ainsi pu être soulignées, et il a été constaté que nombre de ces liaisons sont encore peu explorées par la recherche. Par exemple, l'impact climatique du végétal dépend en partie de l'eau que peuvent utiliser les plantes. Sans eau, elles n'ont qu'une fonction d'ombrage, tant qu'elles peuvent se maintenir en vie (ce qui est particulièrement vrai pour le cas de l'arbre adulte). Le fonctionnement hydrologique de la ville est donc un sous-système clé, sous-système dans lequel la végétation agit également. Le fonctionnement des plantes dépend aussi de leur positionnement dans la forme urbaine : par exemple, elles apportent peu du point de vue climatique si elles sont positionnées dans l'ombre des bâtiments. La forme urbaine apparaît ainsi comme centrale dans l'impact du végétal sur la biodiversité en ville.

La gestion (interventions humaines) et les conditions de croissance des plantes (climat, accès à la lumière et à l'eau, sol, exposition à la pollution, aux dégradations humaines ou animales...) sont des paramètres très influents et peu pris en compte. Il en va ainsi pour presque tous les résultats présentés et quelles que soient les fonctions étudiées : il est important de prendre en compte des conditions urbaines réalistes.

Cependant, la nature en ville ne se limite pas aux services de régulation climatique et hydrologique. Plus difficiles à apprécier quantitativement, la perception des ambiances, les rôles sanitaires et sociaux jouent pour beaucoup dans l'habitabilité et le confort de vie des espaces urbains. En s'attachant à analyser les résultats par dispositifs végétaux, on remarquera que si les façades et toitures ont attiré l'attention des chercheurs ces dernières années, leur mise en compétition avec des formes végétales plus traditionnelles comme les arbres n'est pas très concluante. Comparativement aux arbres qui apportent la fraîcheur de l'ombrage, les toitures végétales auront un effet faible sur le climat urbain et le confort dans les rues, mais un impact hydrologique intéressant et un impact énergétique important l'été sur les bâtiments difficiles à isoler, de faible hauteur, pour lesquels elles pourront de surcroît présenter un intérêt esthétique.

Les arbres sont performants en terme d'adaptation climatique, tant pour l'atténuation de l'Îlot de Chaleur Urbain que pour

maintenir des conditions de confort acceptables dans les espaces urbains. Du point de vue de la consommation énergétique des bâtiments, cela dépend du climat et des éventuelles compensations entre gains d'énergie réalisés sur l'été et pertes en hiver. Par ailleurs, du point de vue du bilan carbone, ils ont un effet très positif, surtout si l'arbre nécessite peu d'entretien.

Au final, chaque dispositif présente des atouts et points faibles différents, et compte tenu de la contrainte d'espace qui se pose dans la ville dense, l'idée peut être de ménager une place suffisante pour toutes les formes de végétation. Il est sans doute également préférable d'éviter la réduction massive de la végétation au sol, même compensée par des alternatives techniques sur les bâtiments. L'idée d'investir les toits, comme cela est d'ores et déjà proposé dans des projets, elle est très séduisante, mais souvent réalisée au détriment des autres formes de végétation comme les arbres. Cette évolution pourrait pourtant s'avérer contreproductive tant du point de vue de la physique de la ville que de son usage. Les dispositifs végétaux techniques, toitures et façades végétales, noues végétalisées, jardins de pluie, etc., peuvent au contraire être vus comme un moyen de réinvestir des surfaces supplémentaires.



Figure 33 : « Revitalisation urbaine », projet IDP étudiant Agrocampus Ouest, VegDUD 2013.

DES CLÉS POUR

COMPRENDRE :

NOTIONS PHYSIQUES ET ENJEUX DE VEGDUD

▶ THERMIQUE DU BÂTIMENT,
CONSOMMATION D'ÉNERGIE
CONFORT INTÉRIEUR



▶ CLIMATOLOGIE URBAINE
HYDROLOGIE



▶ ACOUSTIQUE



BILAN ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT

ENJEUX :



- Thermique du bâtiment
- Consommation d'énergie
- Confort intérieur

Le bilan énergétique permet d'évaluer les besoins énergétiques du bâtiment, qui correspondent à l'énergie nécessaire pour maintenir à l'intérieur la température de consigne voulue par les habitants en chauffant l'hiver ou en climatisant l'été.

Pour faire le bilan énergétique d'un bâtiment il faut prendre en compte :

- 1 L'énergie solaire absorbée par les parois extérieures. Elle correspond au rayonnement solaire reçu (dépend de l'angle d'incidence du rayonnement solaire, de la couverture nuageuse), moins la partie réfléchiée (dépend de l'albédo). L'énergie solaire reçue est divisée en 2 composantes : la composante directe (les rayons solaires) et la composante diffuse, provenant de l'atmosphère.
- 2 L'énergie échangée par rayonnement infrarouge : rayonnement infrarouge reçu moins rayonnement infrarouge émis. Plus une surface est chaude, plus le rayonnement émis est grand. L'énergie reçue dépend de la température des surfaces en vis-à-vis. À l'extérieur, les émissions infrarouges en direction de la voûte céleste représentent une perte d'énergie. À l'intérieur, les échanges d'énergie par rayonnement infrarouge vont contribuer à homogénéiser les températures de surface de l'ensemble des parois (murs, planché, plafond).

- 3 La **convection** aux surfaces extérieures et intérieures : le flux de convection est proportionnel à l'écart de température entre la surface et l'air et à la vitesse de l'air. Que ce soit lié au vent en extérieur ou à la ventilation en intérieur, le renouvellement de l'air au niveau des surfaces favorise la convection thermique en maintenant l'écart de température entre l'air et la surface.
- 4 La **conduction thermique** dans la paroi : elle varie en fonction de son isolation (**conductivité thermique**), de son inertie (**capacité thermique volumique**) et des températures de part et d'autre de la paroi.
- 5 La ventilation (entrée d'air à une température qui dépend du système de ventilation)
- 6 L'importance des surfaces vitrées. Les surfaces vitrées laissent passer une partie du rayonnement solaire qui réchauffe alors directement l'intérieur du bâtiment. En revanche, elles bloquent le rayonnement infrarouge de la même manière qu'une paroi opaque et donc le refroidissement associé (principe des cultures sous serre). D'autre part, elles présentent une moins bonne isolation qu'une paroi car elles ont une faible épaisseur et une conductivité thermique importante (pour le double ou triple vitrage, l'air compris entre les vitres sert de couche isolante).

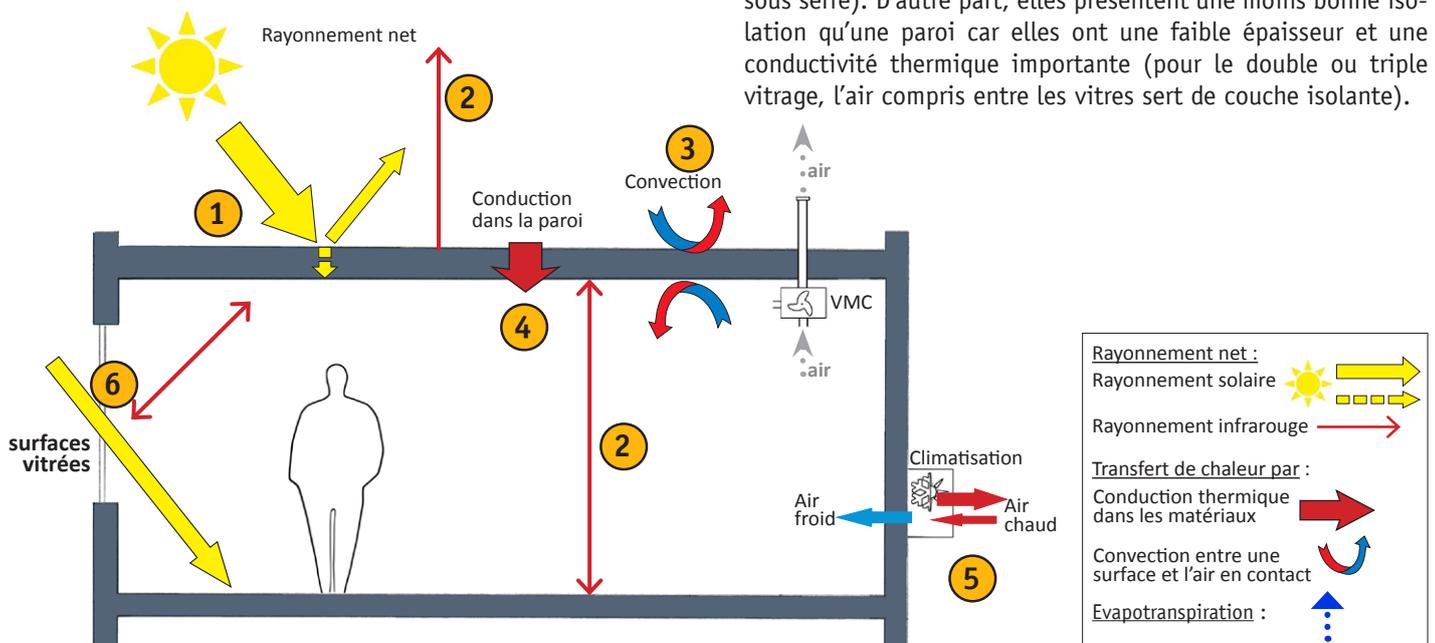


Figure 34 : Bilan énergétique d'un bâtiment et confort intérieur : configuration pour une journée d'été.

La situation évolue en fonction des saisons. En hiver, les températures extérieures étant inférieures aux températures intérieures et le rayonnement solaire réchauffant peu la surface (journée courte et angle d'incidence oblique), les bâtiments perdent de la chaleur à travers les parois. Inversement, l'été, le fort ensoleillement et les températures élevées entraînent une augmentation des températures du bâtiment.

BILAN ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT

ENJEUX :



- Thermique du bâtiment
- Consommation d'énergie
- Confort intérieur

LE BILAN RADIATIF

Au niveau d'une surface, le bilan radiatif consiste à faire la somme du rayonnement solaire absorbé et du rayonnement infrarouge échangé (rayonnement absorbé moins rayonnement émis). Le résultat est appelé rayonnement net.

L'albédo (α) est la caractéristique d'une surface qui détermine la quantité de rayonnement solaire qu'elle va réfléchir. Elle dépend de la couleur et de la rugosité, elle s'approche de 1 pour les surfaces réfléchissantes (blanche) et de 0 quand la surface absorbe le rayonnement solaire (surfaces foncées). L'albédo diminue également avec l'augmentation de la rugosité.

LE RAYONNEMENT

On appelle rayonnement un ensemble d'ondes électromagnétiques. Ces ondes sont des signaux qui peuvent se propager sans support matériel (dans le vide). Les ondes électromagnétiques ont la propriété de transporter de l'énergie. Tout corps émet un rayonnement énergétique en fonction de sa température. Ainsi le soleil (plus de 6000°C) émet un rayonnement de courtes longueurs d'onde (rayonnement solaire) avec un maximum d'intensité dans le visible et la terre (environ 20°C) émet un rayonnement de grandes longueurs d'onde (rayonnement infrarouge). En climatologie et en thermique des bâtiments, ces deux rayonnements sont souvent étudiés de façon indépendante.

INFLUENCE D'UNE COUVERTURE NUAGEUSE SUR LE RAYONNEMENT

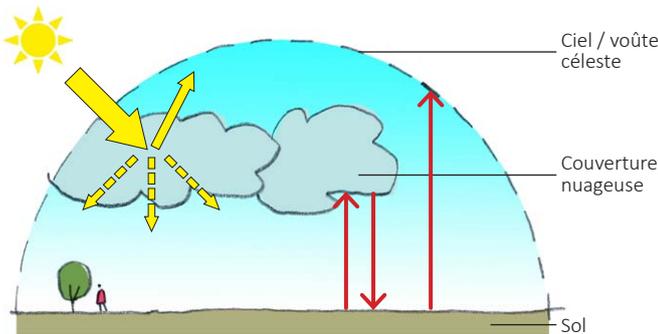


Figure 35 : Influence des nuages sur le bilan radiatif.



CONVECTION

La convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre une paroi et l'air. Elle implique un déplacement de matière dans le milieu. L'air est mis en mouvement soit par la différence de température entre l'air en contact de la paroi et l'air ambiant (convection libre), soit par une cause indépendante (convection forcée).

CONDUCTION THERMIQUE (G)

Lorsqu'un corps n'a pas une température homogène ou lorsque deux corps de températures différentes sont en contact, de la chaleur est transmise de la zone chaude vers la zone froide. Ce processus de transfert de chaleur s'appelle la conduction thermique. La quantité de chaleur échangée est proportionnelle à la différence de température entre la zone chaude et la zone froide.

LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (λ) permet de définir la sensibilité des matériaux au processus de conduction thermique. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant.

LA CAPACITÉ THERMIQUE VOLUMIQUE (C_p) d'un matériau est sa capacité à emmagasiner la chaleur par rapport à son volume. Plus elle est grande plus le matériau peut stocker et restituer une quantité d'énergie importante. L'eau, par exemple, a une capacité thermique volumique plus grande que l'air.

Le rayonnement solaire intercepté par les très petites gouttes est retransmis dans toutes les directions de l'espace, c'est ce que l'on nomme rayonnement solaire diffus. En fonction de l'épaisseur de la couverture nuageuse, une partie du rayonnement solaire est réfléchi (environ 80% au sommet d'un cumulonimbus).

Un ciel clair absorbe peu de rayonnement infrarouge. Une grande partie du rayonnement infrarouge émis par le sol est directement perdue dans l'espace. Par contre, les nuages ont une grande opacité au rayonnement infrarouge thermique et font donc écran aux émissions du sol. Ils émettent eux aussi un rayonnement infrarouge dont environ 50% vers le sol limitant sa diminution de température. Cela explique la douceur lors des matinées nuageuses.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET CONFORT INTÉRIEUR

ENJEUX :



- Thermique du bâtiment
- Consommation d'énergie
- Confort intérieur

Ces deux enjeux sont directement liés : les consommations d'énergie pour la climatisation et le chauffage permettent de conserver un confort thermique acceptable voir confortable.

LE CONFORT THERMIQUE correspond à une situation où les échanges de chaleur entre le corps et son environnement n'engendrent pas de désagrément (transpiration, grelottement) ou plus simplement une situation où l'individu ne ressent pas de gêne relative à une sensation de froid ou de chaud. Pour une approche physique, la notion de confort thermique dépend, en plus de la température ambiante, de la température radiante moyenne, de la vitesse de l'air, de l'humidité de l'air et de l'activité de la personne.

Le confort thermique à l'intérieur d'un bâtiment peut être déterminé (il existe d'autres méthodes) à partir de la température opérative (ressentie par un usager). Cette dernière est une moyenne pondérée de la température radiante moyenne et de la température de l'air de sorte que : plus la vitesse de l'air est grande, plus la température de l'air prend de l'importance; plus elle est faible, plus ce sont les températures de surfaces qui sont ressenties.

La température radiante moyenne est la température d'une enceinte homogène qui enverrait le même flux.

Ainsi, la température de surface des parois a une double influence sur le confort : d'abord directement à travers la température radiante moyenne puis indirectement en modifiant la température de l'air par convection.

Exemple : « Dans un bâtiment ancien, la température moyenne des parois extérieures (murs non isolés et fenêtres simple vitrage) passe fréquemment sous les 13°C, ce qui conduit, pour la même température d'air de 19°C, à des températures opératives de moins de 16°C incitant les usagers à rehausser la température de consigne de leur thermostat d'ambiance à 22-23°C. » (Source : « Les bâtiments à basse énergie - guide technique », l'ADEME Rhône-Alpes (2011) p13).

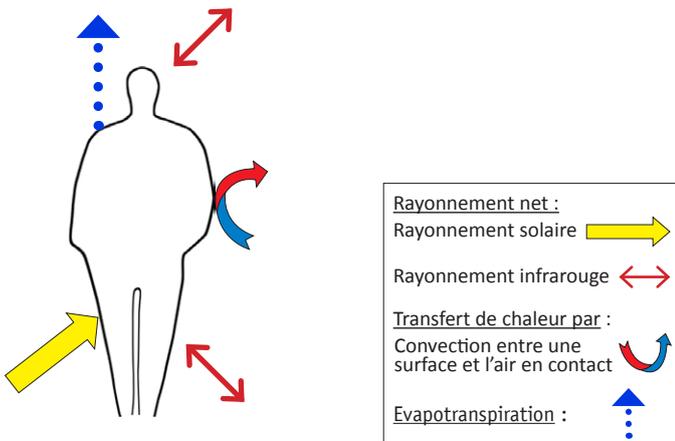


Figure 36 : Bilan thermique du corps avec son environnement. Ce bilan prend en compte l'énergie reçu par rayonnement solaire direct ou réfléchi, l'énergie échangée par rayonnement infrarouge (dépend de la température radiante moyenne), l'énergie échangée par convection (dépend de la température et de la vitesse de l'air) et l'énergie perdue par transpiration (dépend de l'humidité et de la vitesse de l'air).

BILAN HYDROLOGIQUE

ENJEUX :



- Climatologie urbaine
- Hydrologie

Le bilan hydrologique est établi pour une zone et une période données. Il permet de suivre l'état de la réserve en eau du sol en prenant en compte les apports et les pertes.

Le sol est alimenté de façon naturelle par les précipitations (P). Une partie de cette eau est restituée dans l'atmosphère par évapotranspiration (ET), une partie ruisselle (R) et enfin le reste s'infiltré dans le sol (I). L'eau restituée par évapotranspiration prend en compte l'eau interceptée par les surfaces : lors des précipitations, une partie de l'eau stockée en surface s'évapore directement avant d'avoir eu le temps de ruisseler ou de s'infiltrer. Ce phénomène est particulièrement important pour les pluies de faibles intensités.

Pour une surface urbaine donnée, le bilan hydrologique s'écrit : $P = ET + R + I$.

Une des conséquences de la densification urbaine est l'imperméabilisation des sols. Ce phénomène entraîne une réduction de l'infiltration et de l'évapotranspiration. L'augmentation du ruissellement génère une augmentation des volumes produits et des débits de pointe à l'exutoire.

En milieu urbain, les sols sont fortement remaniés, ce qui modifie ses propriétés. Les tranchées creusées pour les canalisations ou autres constructions enterrées puis remblayées, favorisent l'infiltration et drainent le sol environnant. Inversement, les sols compactés par une activité trop importante diminuent sa perméabilité. Le réseau d'eau potable peut alimenter le sol par des fuites, dont l'importance varie selon l'état du réseau et le type de sous-sol. Les réseaux d'eau pluviale et d'eau usée ne sont pas totalement étanches et agissent comme des drains pour les nappes (rabattement de la nappe). Les quantités d'eau mises en jeu ne sont pas forcément significatives à l'échelle d'un événement pluvieux donné, mais peuvent s'avérer importantes à une échelle temporelle plus grande et ne doivent pas être négligées dans le bilan hydrique d'une zone urbaine.

L'ÉVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration correspond à l'évaporation de l'eau contenue dans le sol et à la transpiration issue de la végétation. La vaporisation de l'eau liquide dans les chambre sous-stomatique libère de l'énergie nommée chaleur latente. Après un événement pluvieux, le temps que les surfaces sèchent, c'est le phénomène d'évaporation qui contribue le plus à l'évapotranspiration. Le reste du temps c'est la transpiration qui domine.

La transpiration foliaire dépend des conditions environnementales, les stomates constituent le dispositif de régulation de la transpiration :

- l'évapotranspiration augmente avec la sécheresse de l'air et/ou l'augmentation de la température, jusqu'au seuil où les stomates se ferment,
- lorsque l'humidité du sol diminue, l'absorption racinaire est réduite car l'eau est plus difficilement extractable (notion de potentiel hydrique). Les stomates se ferment alors progressivement et la transpiration diminue d'autant pour limiter le déficit hydrique, ce qui contribue à diminuer la transpiration.

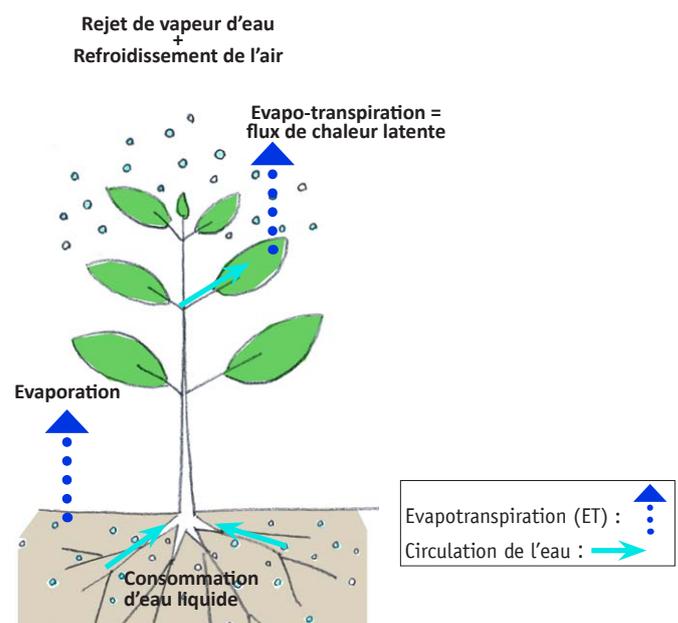


Figure 37 : Evapotranspiration : évaporation au niveau du sol et transpiration de la végétation.

BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UNE SURFACE

ENJEUX :



- Climatologie urbaine

Le bilan énergétique au niveau d'une surface permet de quantifier l'énergie échangée entre celle-ci et l'atmosphère. Ces échanges sont déterminants pour l'évolution des conditions météorologiques. En l'absence de vent (condition anticyclonique), ces échanges en variant en fonction du type de surface (ville, campagne) définissent des microclimats.

Le bilan d'énergie pour une surface peut s'écrire sous la forme simplifiée : $R_n = H_s + LE + G$ avec R_n le rayonnement net (bilan radiatif), H_s et LE les flux de chaleur sensible et latente entre la canopée urbaine et l'atmosphère et G le flux de chaleur par conduction dans le sol et les matériaux.

Le bilan énergétique est couplé au bilan hydrique : l'évapotranspiration (ET) correspond au flux de vapeur d'eau (chaleur latente) disponible au sol. L'évapotranspiration (ET) et le flux de chaleur latents (LE) sont proportionnels : $LE = L_v ET$ (L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau).

CANOPÉE URBAINE

La canopée urbaine correspond à la couche de l'atmosphère située au-dessus du sol terrestre et entre les éléments de rugosité de surface (bâtiments, végétation, ...). Elle a généralement une structure très complexe de par la diversité de ces éléments de rugosité, des types de surface, et des sources et puits de chaleur et d'humidité.

FLUX DE CHALEUR SENSIBLE (H_s)

Le flux de chaleur sensible échangé entre la surface terrestre et l'atmosphère correspond à la quantité de chaleur échangée par convection thermique entre le sol et l'air.

Au contact d'une surface chaude, la surface cède de la chaleur à l'air, les masses d'air chauffées, devenues plus légères, s'élèvent (phénomène de convection). La convection assure ainsi le transport vertical de chaleur depuis les basses couches vers les hautes couches troposphériques.

Si la surface est plus froide que l'air, les masses d'air se refroidissent et descendent.

FLUX DE CHALEUR LATENTE (LE)

On appelle chaleur latente l'énergie nécessaire au changement de phase de l'eau. Lorsqu'il y a condensation, de l'énergie est libérée. Inversement, au cours de l'évaporation, de l'énergie est absorbée afin de faire passer l'eau de l'état liquide à l'état gazeux.

Il faut distinguer les 2 étapes suivantes :

- évaporation de l'eau en surface. Ce processus refroidit la surface et introduit de la vapeur d'eau dans l'atmosphère,
- condensation dans les nuages. Lors de la condensation en eau liquide, la libération de chaleur (passage de l'état gazeux à l'état liquide) réchauffe l'atmosphère.

Le flux de chaleur latente entre la surface et l'atmosphère est donc associé à la quantité de vapeur d'eau introduite dans l'atmosphère. La chaleur ne sera libérée qu'ultérieurement lors de la condensation. D'où l'appellation de chaleur latente (qui se manifeste plus tard).

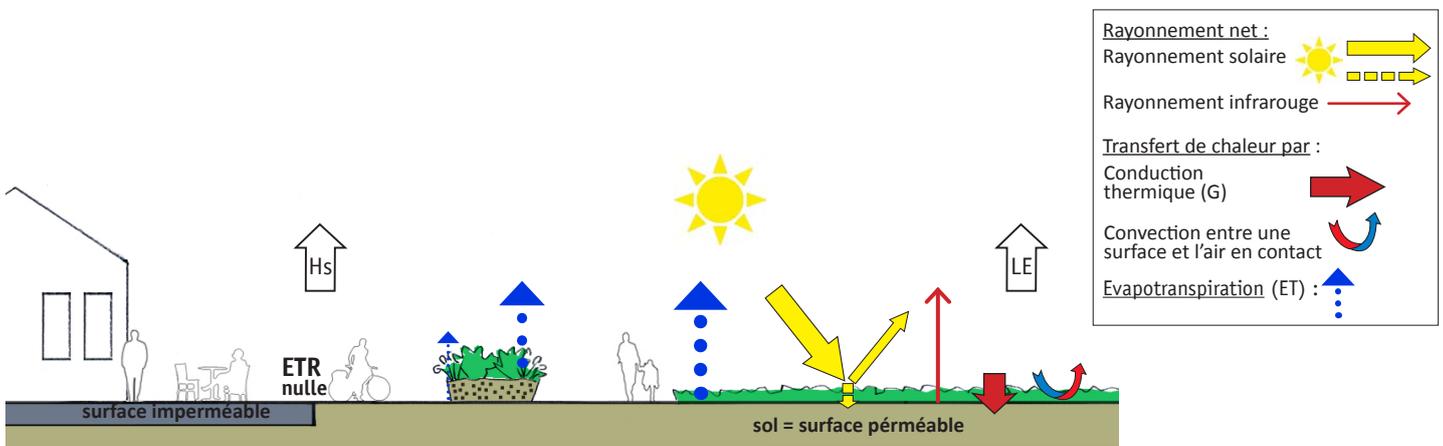


Figure 38 : Bilan énergétique d'une surface (couvert enherbé).

ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

ENJEUX :



- Climatologie urbaine

L'îlot de chaleur urbain (ICU) représente l'élévation de température localisée en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines. Ce phénomène, plus marqué la nuit que le jour, a plusieurs origines :

Radiative : la géométrie des bâtiments et des rues représente un piège radiatif. Le jour, il favorise l'augmentation des températures de surface. La nuit, il limite les pertes de chaleur par rayonnement infrarouge; (Figure 35 et Figure 36).

Thermique : les surfaces urbaines ont une grande capacité thermique (capacité à stocker de la chaleur). La chaleur stockée par conduction dans le sol et les matériaux pendant la journée est donc importante et elle est restituée la nuit, limitant le refroidissement nocturne de l'atmosphère urbaine.

Hydrique : la superficie de sols naturels étant faible en zone urbaine, le flux de chaleur latente correspondant à l'évaporation est limité.

Aérodynamique : l'irrégularité des éléments présents dans la canopée urbaine (bâtiments, parcs, rues, ...), limite les vitesses de vent au niveau du sol, le renouvellement de l'air et l'extraction de la chaleur par convection.

Anthropique : les activités humaines (transport, climatisation, industrie) dégagent de la chaleur.

En comparaison, les zones rurales stockent peu de chaleur durant la journée et celle-ci est très rapidement réémise dans l'atmosphère en fin de journée. Donc l'air se refroidit très rapidement après le coucher du soleil. Ainsi, par rapport aux campagnes environnantes, les villes se réchauffent plus en journée et se refroidissent moins la nuit.

En période de canicule, l'absence de vent ne permet pas de disperser l'énergie accumulée par l'air et les bâtiments de la ville. La température moyenne de l'air reste élevée même la nuit.

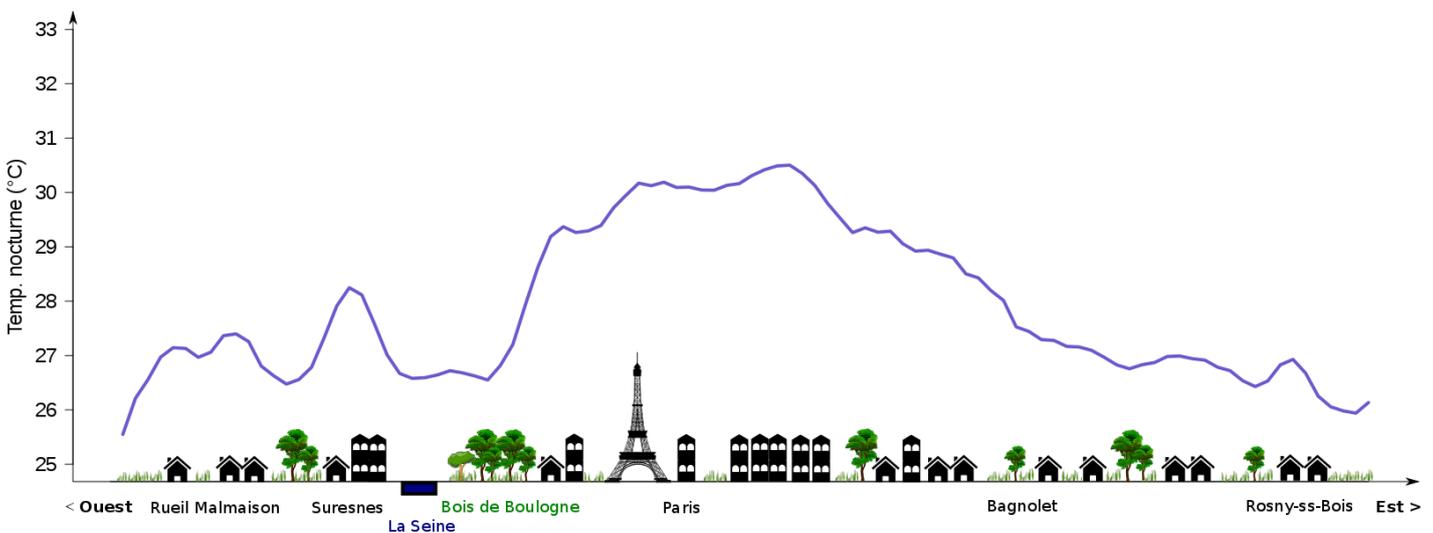


Figure 39 : Ilot de chaleur urbain (Paris, canicule 2003). Source: de Munck et al. (2013) Int. Jour. Climatol.

PIÈGE RADIATIF : EXEMPLE DE LA RUE CANYON

ENJEUX :



▪ Climatologie urbaine

En climatologie urbaine, la configuration la plus étudiée est la « rue canyon », il s'agit d'une rue longée de part et d'autre par des bâtiments. Pour une rue aussi large que haute, le facteur de « vue du ciel » est de 30% au milieu de la rue et de 35% au milieu de la façade. C'est-à-dire qu'une grande partie du rayonnement infrarouge émis et du rayonnement solaire réfléchi au niveau des façades et de la rue, est intercepté. Dans la plupart des cas, les parois ont une réflexion diffuse (le rayonnement solaire réfléchira dans toutes les directions).

Dans ce type de rue, le rayonnement solaire subit plusieurs réflexions et pour chaque réflexion une partie du rayonnement est absorbée contribuant au réchauffement des surfaces. De plus, les pertes d'énergie par rayonnement infrarouge entre la rue et le ciel et la diminution des températures de surface associée sont limitées.

Deux parois, face à face et à la même température, échangent de l'énergie par rayonnement infrarouge pour un bilan neutre (pas d'influence sur leurs températures). Par contre, si une des parois est plus chaude que l'autre, le rayonnement infrarouge échangé favorise le réchauffement de la plus froide et le refroidissement de la plus chaude (cas d'une façade au soleil face à une façade à l'ombre).

Plus les bâtiments sont hauts et rapprochés, plus le facteur de « vue du ciel » est faible. Par contre, le sol étant presque toujours à l'ombre, son réchauffement par le rayonnement solaire est limité.

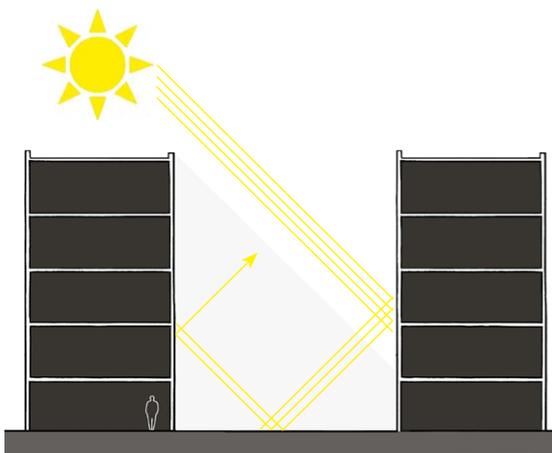


Figure 40 : Réflexion multiple du rayonnement solaire.

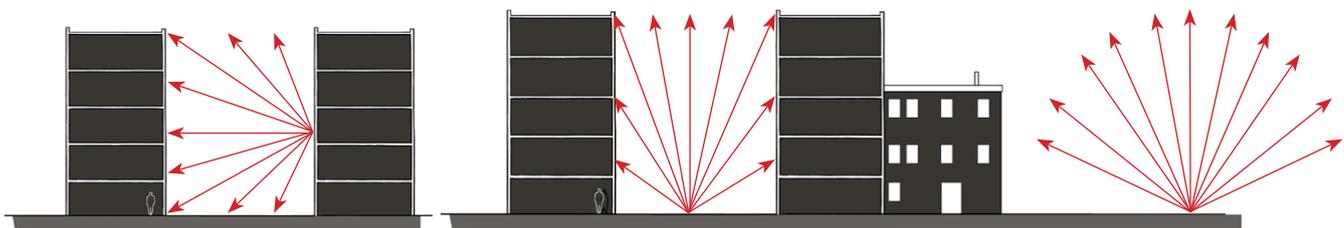


Figure 41 : Interception du rayonnement infrarouge émis dans la rue.

LE FACTEUR « VUE DU CIEL »

Le facteur « vue du ciel » permet de définir, pour une surface, l'importance de la place du ciel (voûte céleste) dans les surfaces en vis-à-vis. Ce facteur permet de définir l'importance du piégeage radiatif.

CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR

ENJEUX :



- Climatologie urbaine

Le confort thermique extérieur, comme le confort intérieur, peut être estimé à partir de la température opérative. Cependant, pour obtenir une évaluation plus pertinente du confort à l'extérieur, il faut aussi prendre en compte l'influence de l'humidité, du vent et de l'activité de la personne (généralement, on considère une personne en train de marcher). L'utilisation de l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) permet de prendre en compte ces facteurs et de donner une indication sur le confort thermique du passant.

Le confort thermique dépend des conditions locales et va varier fortement au sein d'une ville. Par exemple, dans une même rue, l'UCTI sur le trottoir à l'ombre sera beaucoup plus faible que sur celui au soleil. L'orientation de la rue ou la disposition des bâtiments vont modifier la vitesse du vent et de ce fait l'UTCI.

Echelle UTCI (°C)	Niveau de stress
au-dessus de + 46	Stress thermique extrême STEX
+ 38 à + 46	Stress thermique très élevé STTE
+ 32 à + 38	Stress thermique élevé STE
+ 26 à + 32	Stress thermique modéré STM
+ 9 à + 26	Pas de stress thermique PST

Figure 42 : UTCI (Universal Thermal Climate Index) .

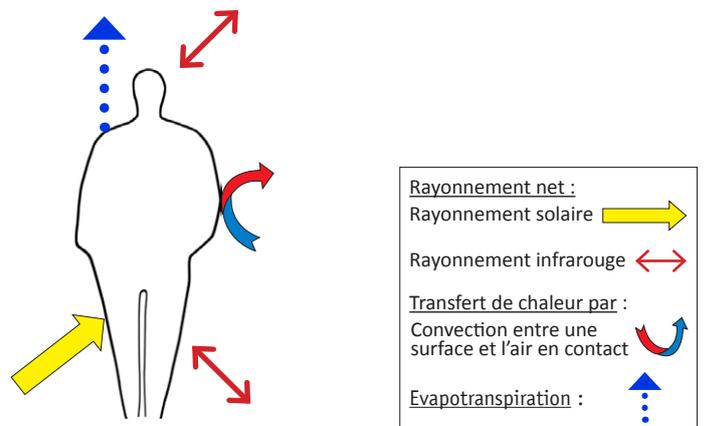


Figure 43 : Bilan thermique du corps avec son environnement. Ce bilan prend en compte l'énergie reçue par rayonnement solaire direct ou réfléchi, l'énergie échangée par rayonnement infrarouge (dépend de la température radiante moyenne), l'énergie échangée par convection (dépend de la température et de la vitesse de l'air) et l'énergie perdue par transpiration (dépend de l'humidité et de la vitesse de l'air).

MICROCLIMAT URBAIN ET TYPE DE QUARTIER

ENJEUX :



▪ Climatologie urbaine

Si le vent est fort, un brassage de l'air entre les différents quartiers et à l'intérieur de la canopée urbaine a pour conséquence d'homogénéiser la thermodynamique de l'air à l'échelle de la ville. De même, pour un ciel couvert, le faible apport énergétique du soleil diminue les écarts de température entre les différentes surfaces, et la température de l'air est quasiment homogène à l'intérieur de la canopée urbaine et au-dessus des différents quartiers urbains.

Par contre, sous certaines conditions météorologiques (fort ensoleillement et vent faible), les fortes hétérogénéités aérodynamiques, thermiques et hydriques des surfaces urbaines complexifient la climatologie des villes. Chaque type de quartier représentant un type de tissu urbain particulier, va développer un microclimat spécifique :

Le centre ville dense : il est caractérisé par une densité de bâtiments élevée. Du fait de la densité des bâtiments et de leur hauteur, le phénomène de piégeage radiatif peut être important. La température de l'air à l'intérieur de la canopée est abaissée par le phénomène d'ombrage des bâtiments. Par contre, la température de l'air située au-dessus de la canopée urbaine est fortement élevée par la grande superficie des toits.

Les zones pavillonnaires : elles se caractérisent par des habitations individuelles ou des petits collectifs entourés par des jardins et des espaces verts. Dans ce type de quartier, les variations de température de l'air dépendent de la proportion des surfaces de sol naturel et de sol minéral.

Les zones industrielles et commerciales : elles sont essentiellement composées de surfaces minérales (voiries, parkings, toitures). Les bâtiments de ces quartiers étant peu élevés et assez espacés, le phénomène d'ombrage est limité. L'air y est donc généralement sec et sa température est souvent l'une des plus élevées de la ville.

Les « grands ensembles » : ils sont caractérisés par de grands immeubles entourés d'espaces verts et de voiries. Ainsi, la température de l'air est atténuée par le phénomène d'ombrage et par l'évapotranspiration issue des espaces verts. Par contre, les bâtiments exposés au rayonnement solaire vont stocker une grande quantité de chaleur.

Dans ces conditions, à l'échelle de la ville, les microclimats des différents quartiers peuvent créer un effet de brise soufflant des quartiers les plus frais vers les quartiers les plus chauds, induit par les mouvements convectifs engendrés par les quartiers les plus chauds.

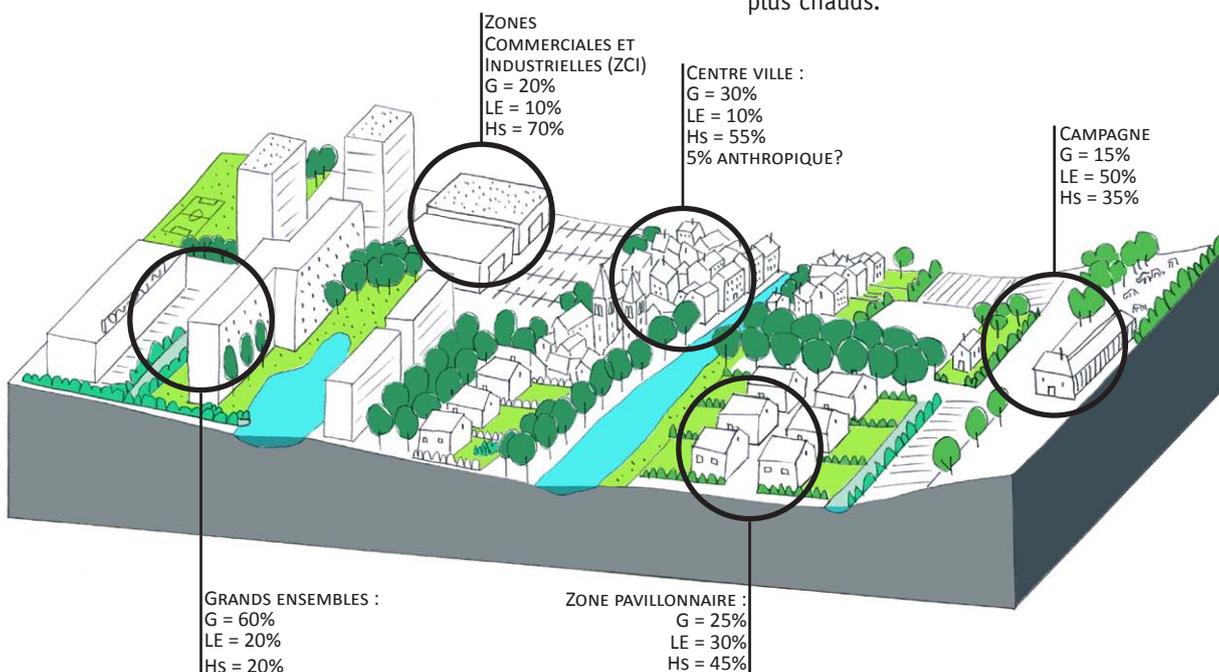


Figure 44 : Répartition de l'énergie reçue par rayonnement (R_n) entre le stockage (G), le flux de chaleur latente (LE) et le flux de chaleur sensible (Hs) pour une journée moyennée sur le mois de juillet ($R_n > 0$, $R_n = G + H_s + LE$) ; zone verte : G=15%, LE=50%, Hs=35% (Source des valeurs numériques : Thèse Sylvain Dupont, Resultat p199, modèle SM2-U avec prise en compte de la canopée urbaine).

ACOUSTIQUE

ENJEUX :



▪ Acoustique

LE SON

Un son est une sensation auditive engendrée par le passage d'une onde acoustique. Cette onde est générée par une vibration (cordes vibrantes, cordes vocales, membrane d'un haut-parleur,...), qui crée un déplacement de particules du milieu de propagation (air, eau,...) autour d'une position d'équilibre. Le son ne se propage donc pas dans le vide.

La vitesse de propagation du son dépend des propriétés du milieu de propagation, en particulier sa température. La vitesse de propagation du son dans l'air à 20° C est d'environ 340 m/s.

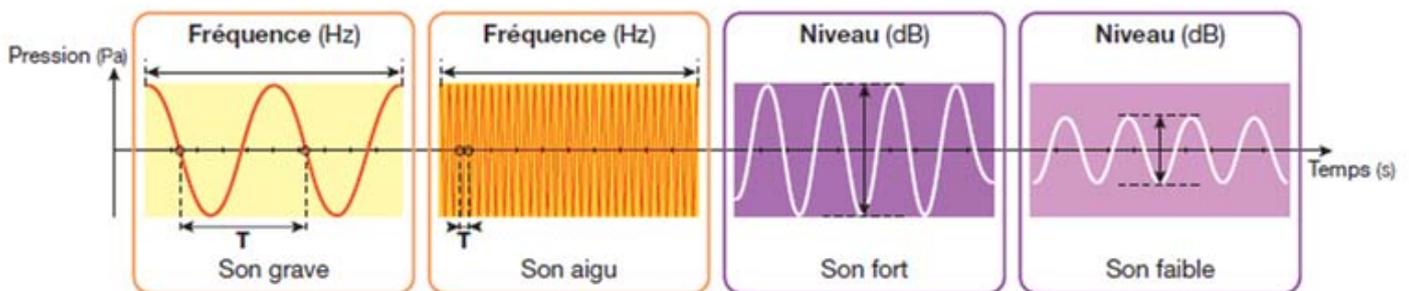


Figure 45 : Caractéristique d'un son : grave ou aigu, son fort ou son faible (T est la période de l'onde). Source : ISOVER.

La fréquence est le nombre d'oscillations périodiques d'une onde par seconde. Elle s'exprime en Hertz (Hz). Une fréquence de 100 Hz correspond donc à 100 oscillations par seconde. Les fréquences audibles par l'être humain s'étendent de 20 Hz à 20 kHz. Ces chiffres peuvent varier suivant l'âge et les personnes. Notons également que nos oreilles sont plus sensibles aux fréquences médiums (500 Hz à 4 kHz) et aiguës (4 à 16 kHz) qui correspondent aux fréquences de la voix, qu'aux sons graves (20 à 500 Hz). Les sons en-dessous de 20 Hz (infrasons) et au-dessus de 20 kHz (ultrasons) ne donnent pas lieu à une sensation sonore.

L'absorption de l'énergie sonore par le milieu de propagation (atmosphère) ou par les frontières du milieu (sol herbeux, surfaces végétalisées, neige, etc.) augmente rapidement avec la fréquence. Par conséquent, les sons graves se propagent plus loin que ceux aigus. Les caractéristiques acoustiques des surfaces doivent donc être connues, notamment leur impédance acoustique.

IMPÉDANCE ACOUSTIQUE

Elle permet de caractériser les propriétés d'absorption du son d'un milieu. Il est possible de connaître le comportement d'une onde sonore à l'interface de deux surfaces (exemple : air / surface végétalisée) à partir de l'impédance acoustique de ces deux surfaces.

ACOUSTIQUE

ENJEUX :



▪ Acoustique

L'ENVIRONNEMENT SONORE

Afin de caractériser un environnement sonore, plusieurs indicateurs acoustiques peuvent être utilisés, voire combinés entre eux : le niveau de pression sonore (en dB), le temps de réverbération (en secondes), le niveau sonore dépassé pendant 90% du temps (pour mesurer le bruit de fond), le niveau sonore dépassé pendant 10% du temps (pour mesurer l'émergence d'événements sonores), etc.

Les sections suivantes présentent 2 indicateurs couramment utilisés, en particulier dans le cadre du projet VegDUD : le niveau de pression sonore et le temps de réverbération.

INDICATEUR 1 : LE NIVEAU DE PRESSION SONORE MESURÉ EN dB

La grandeur caractéristique d'un son la plus accessible à la mesure (au moins dans les gaz) est la pression acoustique. En un point de l'espace, elle est définie comme étant la partie fluctuante de la pression totale autour d'une valeur moyenne constante, représentant la pression atmosphérique au repos. Son unité de mesure est le Pascal (Pa). Afin de rendre compte de la réponse de l'oreille humaine à ces fluctuations de pression, on préfère exprimer la pression acoustique sur une échelle logarithmique (en décibels), relativement à une pression de référence (typiquement $2 \cdot 10^{-5}$ Pa).



Figure 46 : Niveau sonore. Source : ANSES.

Ce niveau de pression sonore est souvent représenté par bandes de fréquences (typiquement en 1/3 d'octaves) ou cumulé sur l'ensemble des fréquences (et parfois pondéré pour donner le dB(A)). En résumé, le niveau de pression sonore s'exprime en décibels (dB). Si l'on considère le niveau global (i.e. intégrant toutes les fréquences), le seuil d'audition de notre oreille se situe à 0 dB et le seuil de douleur aux alentours de 120 dB.

L'unité « dB » ne s'additionne pas de manière arithmétique mais selon une progression logarithmique. Ainsi, deux sources d'un niveau sonore de 70 dB chacune ne donnent pas une source sonore équivalente de 140 dB mais bien de 73 dB. En effet, doubler la source sonore revient à ajouter 3 dB. Pour avoir une sensation de doublement du niveau sonore, il faut une augmentation d'environ 10dB. La différence entre deux signaux sonores est audible s'ils présentent une variation de l'ordre de 5dB minimum.

INDICATEUR 2 : LE TEMPS DE RÉVERBÉRATION

Soit un son bref, appelé impulsion, émis par une source sonore (pistolet par exemple). Le premier front d'onde qui arrive à un microphone est appelé champ direct. La multitude d'ondes réfléchies par les parois constitue le champ réverbéré. L'analyse de ces champs donne accès à la réponse impulsionnelle, qui traduit de quelle manière l'environnement modifie le son émis par la source.

Le temps de décroissance précoce (EarlyDecay Time – EDT) est un indicateur fréquemment utilisé pour caractériser la sensation de réverbération. Il correspond au temps nécessaire pour que le niveau sonore dû aux réflexions sur les surfaces environnantes décroisse de 10dB après extinction de la source (dans un espace relativement clos).

PRINCIPALES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES PAR CHAPITRE

ENJEUX & MÉTHODES

Publication et thèse réalisées dans le cadre du projet :

Musy M. (2014), Une ville verte - Les rôles du végétal en ville. 200p. Edition Quae.

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

A propos des modèles :

TEB : <http://www.cnrm-game.fr/spip.php?article199>

TRNSYS : <http://www.cstb.fr/actualites/webzine/editions/edition-du-14-decembre-2010/trnsys-17-une-percee-dans-la-modelisation-thermique-de-batiments.html>

Solene-microclimat : <http://www.urban-modelling.org/fr/galerie-des-modeles/parcourir-la-galerie/article/solene-microclimat-interactions.html#Objectifs-description>

TOITURES ET FAÇADES

ARRDHOR CritHortile, Plante & Cité (2013), Enquête et retour d'expériences de gestionnaires de murs végétalisés. Compte-rendu d'étude. www.plante-et-cite.fr

Le vivant et la Ville (2014), Guide des bonnes pratiques : Enveloppes végétalisées du bâti.

UNEP(2009), Les toitures végétalisées, UNEP Mag 3.

CSTB (2012), Guide pratique les toitures végétalisées.

CSTB (2012), Liste des Avis Techniques du GS 5 valide au 22 mai 2012. e-cahier 3712.

Le MONITEUR (2008), Végétalisation extensive des terrasses et toitures.

ADIVET/CSFE/UNEP/SNPPA (2007), Les règles professionnelles pour la conception et la réalisation de terrasses et toitures végétalisées, édition n°2.

Sites spécialisés :

ADIVET (association française des toitures et façades végétales) : <http://www.adivet.net/>

UNEP, les entreprises du paysage : <http://www.entreprisesdupaysage.org/>

Le Vivant et la Ville : <http://www.levivantetlaville.com/>

Publications et thèses réalisées dans le cadre du projet :

Djedjig R., Ouldboukhithine S.-E., Belarbi R. and Bozonnet E. (2012), Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. Int. Commun. Heat Mass Transf. 39, 752-761.

Djedjig R., Bozonnet E. and Belarbi R. (2013), Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. Int. J. Low-CarbonTechnology.

Guillaume G. (2013), Évaluation de l'impact de revêtements végétaux sur les ambiances sonores. Thèse.

Malys L. (2009), Modélisation climatique des façades végétales : caractéristiques radiatives des couvertures végétales de façades. Thèse de Doctorat, ENSA Nantes et Ecole Centrale de Nantes.

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

HYDROLOGIE URBAINE

Planification et mise en œuvre des aménagements :

Communauté urbaine du Grand Lyon(2010), Les ouvrages aériens de gestion des eaux pluviales.

Communauté urbaine du Grand Toulouse (2009), Guide de gestion des eaux de pluie et de ruissellement.

Conseil Général Essonne. Eaux pluviales urbaines, une gestion à la source contre les inondations et les pollutions.

Natureparif (2013), La phyto-épuration : des plantes pour traiter les eaux usées.

GRAIE (2007), Guide pour la prise en compte des eaux pluviales dans les documents de planification et d'urbanisme.

Cadre réglementaire :

LOI n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques.

ARBRES

Communauté Urbaine du Grand Lyon (2011), Charte de l'arbre.

SEVE Nantes (2006), Charte de l'arbre à Nantes.

SURFACES ENHERBÉES

Provendier D., Damas O. (2010), Couverts herbacés des espaces verts urbains et péri-urbains : enjeux fonctionnels et perspectives d'innovations. Fourrages n°203.

DES CLÉS POUR COMPRENDRE

ADEME Rhône-Alpes (2011), Les bâtiments à basse énergie - guide technique.

ANSES (2013), Évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Février 2013. Édition scientifique.

<https://www.anses.fr/sites/default/files/documents/AP2009sa0333Ra.pdf>

APUR (2011), Mieux vivre à Paris pendant la canicule. www.apur.org.

DeMunck C., Pigeon G., Masson V., Meunier F., Bousquet P., Tréméac B., Merchat M., Poeuf P. and Marchadier C. (2013). How much can air conditioning increase air temperatures for a citylike Paris, France? International Journal of Climatology 33 : 210-227.

Dupont S. (2001), Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sols urbains pour submeso. Thèse université de Nantes.

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

Crédits photographiques : Plante&Cité, à l'exception de :

Photo n°1 : IRSTV; Photo n°5 : Beyond My Ken /CC BY-SA 3.0; Photo n°6 : Joe Shoe («dittmeyer») /CC BY 2.0; Photo n°7 : IRSTV; Photo n°8 : LaSIE; Photo n°9 : Météo-France; Photo n°10 : Ifsttar; Photo n°11 : ONERA; Photo n°23 : Laure Cormier; Photo n°27 : IRSTV.