



HAL
open science

Éléments méthodologiques pour la production des scénarios de végétalisation d'un quartier dans un objectif de réduction de la consommation énergétique des bâtiments

Karina Azos Diaz

► **To cite this version:**

Karina Azos Diaz. Éléments méthodologiques pour la production des scénarios de végétalisation d'un quartier dans un objectif de réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Architecture, aménagement de l'espace. 2011. dumas-00639214

HAL Id: dumas-00639214

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00639214>

Submitted on 8 Nov 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS

SPECIALITE AMBIANCES ET FORMES URBAINES

Année 2010/2011

Thèse de Master STEU

***Diplôme cohabilité par
l'École Centrale de Nantes,
l'École Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes,
l'École Supérieure d'Architecture de Nantes,
l'Université de Nantes***

Présentée et soutenue par :

KARINA AZOS DIAZ

le 26 septembre 2011

à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes

TITRE

**ELEMENTS METHODOLOGIQUES POUR LA PRODUCTION DE SCENARIOS DE VEGETALISATION D'UN QUARTIER DANS UN
OBJECTIF DE REDUCTION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS.**

JURY

Examineurs :

Marjorie MUSY	Ingénieur de recherche au CERMA
Virginie ANQUETIL	Ingénieur en charge Plante et Cité
Pascal JOANNE	Enseignant-chercheur à l'ENSA Nantes, Directeur du CERMA
Thomas LEDUC,	Ingénieur de recherche au CERMA
Gwendall PETIT	Ingénieur d'études ECN

Directeur de mémoire : Marjorie MUSY

Laboratoire/Institution : CERMA

Résumé

La configuration de l'espace urbain, ainsi que les éléments qui la composent participent de manière active aux performances énergétiques des bâtiments en les rendant plus énergivores ou plus économes. L'utilisation de la végétation en ville apparaît comme une solution alternative pour la réduction de la consommation énergétique des bâtiments, mais aussi de lutte contre l'îlot de chaleur urbain. Dans ce rapport de master, les effets directs et indirects des dispositifs végétaux sur les consommations énergétiques des bâtiments sont abordés à partir d'une analyse de la bibliographie disponible sur ce sujet.

Ce rapport de master expose dans un premier temps les phénomènes induits par la végétation sur le microclimat et sur la consommation énergétique des bâtiments, ainsi que les paramètres qui déterminent la manière dont les dispositifs végétaux répondent aux conditions environnantes. À partir de la synthèse bibliographique, une sélection et une classification des dispositifs sont faites, basées sur leurs effets directs et indirects sur la consommation énergétique des bâtiments. La compréhension du comportement de ces dispositifs a permis de proposer des critères d'application pour une construction stratégique de scénarios de végétation. Enfin, le travail de recherche a abouti à la production d'un scénario de végétation mise en place sur un SIG et appliqué à un quartier qui fait l'objet de mesures et qui fera l'objet des simulations.

Mots clés : Dispositifs végétaux, consommation énergétique, microclimat, SIG, bâtiment.

Abstract

The configurations of urban spaces, as well as its components participate actively in the energy performance of buildings by making them either more energy-greedy or more energy-saving. The use of vegetation in the city emerge then as an alternative solution for reducing building energy consumption and also to fight against the urban heat island. In this master thesis, the direct and indirect effects of vegetal systems on building energy consumption are discussed from available literature on the subject.

At first this work present the phenomena induced by plants on microclimate and building energy consumption, and the parameters that determine how vegetal systems respond to the environment. Then, a selection and classification of vegetal systems were made based on their direct and indirect effects on building energy consumption. Understanding the behavior of these systems allowed us to propose some practical criteria for the conception of strategic scenarios of vegetation. Finally, the conception of a scenario of vegetation was developed in GIS and applied to a neighborhood that is subject of measures and that which will be simulated.

Key words: vegetal systems, energy consumption, microclimate, GIS, building.

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures	3
Liste des tableaux	5
Introduction	6
1 Rôle de la végétation en ville sur la consommation énergétique des bâtiments	8
1.1 Effet du microclimat urbain sur la consommation énergétique des bâtiments	8
1.2 Caractérisation du fonctionnement climatique de la végétation	9
1.2.1 Bilan énergétique de la végétation	9
1.2.2 Paramètres influents sur le comportement de la végétation	11
1.2.2.1 Déficit de Vapeur de Pression <i>VPD</i>	11
1.2.2.2 Potentiel Hydrique ψ	12
1.2.2.3 Conductance stomatique g_s	12
1.2.2.4 Indice de surface foliaire <i>LAI</i> (Leaf Area Index)	13
1.2.3 Le continuum sol-plante-atmosphère SPAC	15
1.2.3.1 Le modèle SPAC par analogie électrique	18
1.2.3.2 Comportement des plantes sous différentes conditions	19
1.3 Effet de la végétation sur la consommation énergétique des bâtiments	21
1.3.1 Effets Directs	22
1.3.1.1 Transmissivité du rayonnement solaire	23
1.3.1.2 Albedo	24
1.3.1.3 Emissivité IRT	24
1.3.1.4 Perméabilité	25
1.3.1.5 Autres paramètres	25
1.3.2 Effets Indirects	26
1.3.2.1 Evapotranspiration	27
2 Construction des scénarios	31
2.1 Présentation des Dispositifs Végétaux	31
2.1.1 Toiture végétale	32
2.1.1.1 Toiture végétale Extensive	32
2.1.1.2 Toiture végétale Intensive	36
2.1.2 Façade Végétale	39
2.1.3 Arbres d'alignement	43
2.1.4 Masses végétales et parcs	45
2.1.5 Conclusions	50
2.2 Critères d'application des dispositifs végétaux	51

2.3	Cadre SIG	55
3	Application des dispositifs pour la construction d'un scénario de végétation à Pin Sec	60
3.1	Présentation du site d'étude: Pin Sec	60
3.1.1	Plan masse actuel	61
3.1.2	La végétation existante	62
3.1.3	Conditions Climatiques: Vent et Ensoleillement	62
3.1.4	Règlementation du site de Pin Sec Zone UH	65
3.2	Construction d'un scénario d'application des dispositifs et mise en place dans un SIG	66
3.2.1	Formalisation des critères	66
3.2.2	Plan masse Proposition: densification	70
3.2.3	Proposition des dispositifs végétaux	72
3.3	Proposition d'un outil d'évaluation des scénarios	74
3.3.1	Free-Running: Stratégie de rafraîchissement par système passif	74
3.3.2	Estimation des degrés-heures par la méthode «bin»	76
3.3.3	Évaluation de la performance énergétique d'un bâtiment	80
	Conclusions	82
	Annexe A	84
A.1	Conditions des simulations pour les différents scénarios du fragment urbain	84
A.2	Résultats des simulations des toitures végétales et non végétales sur TRNSYS	85
A.3	Valeurs du coefficient d'extinction κ_l en fonction de la distribution des feuilles	86
	Bibliographie	87

TABLE DES FIGURES

1.1	Pertes par chaleur latente dans 4 jours représentatifs à Hong Kong [Jim and Tsang, 2010]	11
1.2	Déficit de vapeur de Pression VPD [Gil Pelegrín et al., 2005] . .	12
1.3	Effet du LAI sur le rayonnement solaire transmis [Palomo del Barrio, 1998]	15
1.4	Représentation du modèle SPAC par analogie électrique (Adaptée de [Guyot, 1997])	16
1.5	Représentation schématique d'un stomate [Allen et al., 2006] .	20
1.6	Taux de transpiration de la végétation en fonction du vent [Medina R, 2011]	21
1.7	Représentation schématique des mécanismes de fonctionnement de conductivité des stomates en fonction des différents facteurs climatiques [Guyot, 1997]	21
1.8	Variation de l'évapotranspiration des feuilles pour différentes vitesses de vent [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]	29
2.1	Coupe des toitures Intensives, semi-intensives et extensives. Extrait de http://www.adopta.fr/site	32
2.2	Total des économies d'énergie d'un toiture végétale	35
2.3	Effet de l'épaisseur de la couche de substrat L sur le flux de chaleur dans la toiture (LAI=5, humidité contenue dans le sol $w = 40\%$) [Palomo del Barrio, 1998]	37
2.4	Variation de la température sous le sol en fonction de la profondeur [Sanchez de la Flor and Alvarez Dominguez, 2004]	38
2.5	Dispositif expérimental des murs végétalisées à Hortpark à Singapour. Extrait de: http://comesingapore.com/gallery/photo/1621/living-walls-at-hortpark	40
2.6	Température moyenne de surface du mur et du substrat façade végétale VGS2 et murs vivants VGS4, VGS5 et VGS8 [Wong et al., 2010]	41
2.7	Economies d'énergie en fonction du rapport hauteur arbre/hauteur façade [Sanchez de la Flor, 2002]	44
2.8	Températures de surfaces et température de l'air journalières: surface d'asphalte et surface en gazon	45
2.9	Configurations urbaines pour la simulation des effets des zones arborées [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]	46
2.10	Profil de températures obtenu pour les différentes configurations urbaines [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]	47
2.11	Réduction de la température T dans les zones sous le vent derrière le parc en relation au rapport zone végétal et zone construite [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]	48

2.12	Variation de la température de surface avec le pourcentage de surfaces végétalisées dans quatre sites à UK [Whitford et al., 2001]	50
2.13	Schéma de processus de construction des scénarios	59
3.1	Plan de localisation du site d'intervention à Nantes. Extrait de: http://www.openstreetmap.org	60
3.2	Plan Masse Actuel Pinsec	61
3.3	Température, direction et vitesse du vent à Nantes (statistiques basées sur des observations entres Juillet 2001 et juillet 2011). Source: http://fr.windfinder.com	64
3.4	Simulation d'ensoleillement sur le site d'étude Pin Sec	65
3.5	Calcul des indicateurs: orientation, COS et CES	69
3.6	Plan Masse Proposition Pin Sec	71
3.7	Proposition des dispositifs végétaux sur Pin Sec	73
3.8	Simulation d'ensoleillement sur la proposition de plan masse à Pin Sec	74
3.9	Stratégie de régulation pour la climatisation, confort et chauffage d'un bâtiment free-running avant et après avoir désigner une stratégie passive ($T_{st} < T_{fr}$) [Ghiaus and Rosales, 2007]	75

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Propriétés solaires et thermiques moyennes des feuillage d'arbres [Bouyer, 2009]	24
1.2	Valeurs globales d'albédo et d'émissivité de la végétation [Vinet, 1999]	24
1.3	Caractéristiques des matériaux en fonction des conditions des propriétés thermiques	26
2.1	Classification des Dispositifs végétaux	31
2.2	Variation de la température température moyenne journalière de la surface extérieure des toitures végétales et non végétales, isolées et non isolées	33
2.3	Scénarios adoptés pour la simulation en TRNSYS	34
2.4	Caractéristiques des toitures adoptées pour la simulation en TRNSYS	34
2.5	Économies d'énergie pour chaque scénario	35
2.6	Conclusions des résultats obtenus en termes de différence de température de surface entre les systèmes végétaux et le mur non végétalisé	42
2.7	Pourcentage de la couverture de type de surface pour quatre sites à Merseysude UK [Whitford et al., 2001]	49
2.8	Paramètres influents sur le comportement énergétique et climatique des dispositifs végétaux	52
2.9	Critère d'application en fonction de la performance	54
2.10	Critère d'application en fonction de la morphologie	55
2.11	Autres critères d'application	55
3.1	Implantation des constructions par rapport aux limites séparatives PLU	66
3.2	Implantation des constructions par rapport aux limites séparatives PLU	66
3.3	Économies d'énergies en climatisation par stratégie passive	76
3.4	Économies d'énergie en chauffage par stratégie passive	77
3.5	Degrés-Heures et Degrés-Heures pour un «Bin»	79
A.1	Configuration des Cas d'études pour la simulation	84
A.2	Résultat des simulations des toitures végétalisées et non végétalisées sur TRNSYS pour chaque des différents scénarios [Niachou et al., 2001]	85
A.3	Valeurs des coefficient d'atténuation pour le rayonnement grande longueur d'onde, représentant l'angle de distribution des feuilles. α est l'angle entre les feuilles et le plane horizontal. [Palomo del Barrio, 1998]	86

INTRODUCTION

Suite au constat des effets de la minéralisation des surfaces et des activités engendrés par l'homme sur le microclimat, l'effet de l'îlot de chaleur urbain ICU est désormais placé au centre de plusieurs recherches. Ce phénomène se traduit par une augmentation de la température dans les centres urbains par rapport à la température rurale environnante. L'environnement urbain peut alors modifier les échanges radiatifs intervenant sur le bilan énergétique de la surface urbaine, générant ainsi un impact sur le microclimat, mais aussi sur la consommation énergétique des bâtiments. Face aux impacts de l'ICU, la végétation apparaît comme une solution possible au développement durable de la ville. Dans cette perspective, l'IRSTV¹ a mis en place le projet ANR² VegDUD qui cherche à évaluer les rôles de la végétation en ville.

L'utilisation de la végétation en ville a de multiples avantages : climatiques, énergétiques, amélioration du cadre de vie et promotion de la biodiversité entre autres. Du point de vue énergétique et climatique, ces effets sont séparés en effets directs et effets indirects.

Sur la consommation énergétique des bâtiments, les effets directs de la végétation sont principalement liés à l'interception du rayonnement solaire et à la protection contre le vent. Dans les échanges radiatifs, la végétation se comporte comme un matériau semi-transparent face au rayonnement solaire direct et comme un matériau opaque face aux rayonnements infrarouges de grande longueur d'onde GLO. D'autre part, les effets directs de la végétation dans les écoulements d'air sont liés à une perte de charge de sa vitesse, limitant ainsi les échanges par convection entre la surface de la façade et l'atmosphère.

Les effets indirects de la végétation sur la consommation énergétique des bâtiments, sont principalement liés aux effets directs que celle-ci produit sur le microclimat : L'évapotranspiration. Ce phénomène intervient dans le bilan énergétique en modifiant le flux de chaleur latente, c'est-à-dire que la quantité d'énergie requise pour que ce phénomène ait lieu est prise de l'air ambiant. Ainsi, le taux d'évapotranspiration se traduit par un potentiel de refroidissement de l'atmosphère. On peut remarquer que les effets directs de la végétation sur le microclimat peuvent devenir des effets indirects sur la consommation énergétique des bâtiments et vice-versa.

Plusieurs recherches ont été réalisées afin d'évaluer le rôle de la végétation en milieu urbain, et de déterminer son comportement sous certaines conditions, sans forcément distinguer les effets directs et indirects sur la consommation énergétique des bâtiments. D'ailleurs, ces recherches se sont plus orientées vers

1. Institut de Recherche des Sciences et Techniques de la Ville

2. Agence National de la Recherche

les effets sur le microclimat. Grâce aux recherches réalisées sur des dispositifs de végétation, une reconstitution de leurs effets est faite à partir des résultats obtenus par modélisation, simulation et campagnes expérimentales. Il est important cependant de savoir que ces résultats ne sont pas transposables, car ils dépendent de paramètres locaux : forme urbaine, climat, caractéristiques des bâtiments, entre autres. cependant, ces résultats, permettent d'avoir une compréhension du comportement de différents dispositifs végétaux.

L'objectif principal de ce travail est de produire les éléments de constitution d'un scénario qui permettrait d'optimiser la réduction de la consommation énergétique des bâtiments dans un fragment urbain ou à plus grande échelle, à partir de l'application des dispositifs végétaux. Pour cela, une étude bibliographique a permis dans une première partie de ce travail de comprendre le fonctionnement des plantes et de comprendre leurs mécanismes de réponse et de régulation. La plante est un système complexe où différents paramètres interviennent et déterminent sa manière de répondre lorsqu'elle est soumise aux conditions environnantes. Dans cette étape ces paramètres sont identifiés et exposés.

Ensuite, grâce aux recherches réalisées, des dispositifs de végétation pour l'utilisation en ville sont sélectionnés et classés par rapport à leur impact. En dehors de paramètres liés directement à la végétation, des autres paramètres surgissent comme indispensables lors de l'application des stratégies pour la réduction de la consommation énergétique des bâtiments à partir des dispositifs végétaux.

Dans la dernière partie du travail, la construction d'un scénario de végétation est proposée en appliquant les dispositifs. Sa mise en place est faite sur un Système Informatique Géographique (SIG). Le site d'étude choisi est un fragment urbain de Nantes localisé sur le quartier de Pin Sec sur lequel l'IRSTV accumule les résultats expérimentaux et études pour la simulation. Après d'une proposition de densification du quartier, des sites potentiels pour l'application des dispositifs végétaux sont identifiés. Dans cette dernière étape, une méthodologie d'évaluation est exposée ; Cette méthodologie permettrait d'évaluer l'impact des stratégies adoptée pour l'application des dispositifs végétaux sur la consommation énergétique des bâtiments.

RÔLE DE LA VÉGÉTATION EN VILLE SUR LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS

1.1 EFFET DU MICROCLIMAT URBAIN SUR LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS

La nature de l'occupation du sol et la configuration urbaine, entre autres, génèrent des modifications du bilan énergétique de la ville. Ainsi, la température dans les zones urbaines est généralement plus élevée par rapport aux zones rurales environnantes. Ce phénomène est connu sous le nom d'*îlot de chaleur urbain* (ICU). Sur ce phénomène, on observe aussi des différences de température au sein d'une même ville que modifient le microclimat urbain et ont un effet direct sur la consommation énergétique des bâtiments.

Sur l'effet de l'ICU, [Akbari et al., 2001] affirment que dans les villes typiques, les températures pendant les nuits d'été sont en moyenne 2.5°C plus élevées que celles des alentours. Par ailleurs une augmentation de 1°C génère des pics de consommation variant de 2 à 4% pour des températures au-dessus de 20°C [Akbari et al., 1992].

Bilan énergétique en milieu urbain

Le bilan énergétique en milieu urbain permet d'associer les différents paramètres de transfert thermique qui déterminent les transformations du microclimat. L'équation ci-après permet d'exprimer le bilan énergétique d'un espace urbain [Oke, 1987] :

$$Q + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1.1)$$

Avec

Q : Flux de rayonnement sur l'ensemble du spectre électromagnétique [Bouyer, 2009],

Q_F : Flux anthropique ou anthropogénique,

Q_H : Flux turbulent de chaleur sensible,

Q_E : Flux turbulent de chaleur latente (à l'inverse de la chaleur sensible il est plus important en rase campagne qu'en ville [Ait-Ameur, 2002]),

ΔQ_S : Quantité de chaleur stockée : elle varie en fonction de la densité bâtie, elle sera donc plus importante dans les zones plus denses, du fait d'une plus grande surface de stockage et de la capacité thermique des matériaux [Ait-Ameur, 2002],

ΔQ_A : Flux advectif, correspondant à la quantité de chaleur fournie ou prélevée à la masse d'air. L'écoulement d'air au dessus de la surface. [Bouyer, 2009].

L'ensemble des flux est exprimé en $W.m^{-2}$.

Il est nécessaire de connaître les caractéristiques et propriétés de la zone urbaine afin de déterminer chacun des termes du bilan énergétique et donc des paramètres que modifient le microclimat [Ait-Ameur, 2002] et [Bouyer, 2009]. A titre d'exemple, on pourrait citer l'effet de la morphologie urbaine (orientation, géométrie, etc) et la nature de surfaces sur le flux radiatif. [Bouyer, 2009] propose une série de paramètres ayant une influence sur le microclimat dans lesquels il tient compte des aménagements végétaux. Il présente ensuite une classification des paramètres du microclimat ayant un effet sur la consommation énergétique des bâtiments parmi lesquels on peut citer :

- La température de l'air,
- les flux solaires,
- les échanges radiatifs infrarouges,
- le vent,
- les transferts d'humidité.

Dans la canopée urbaine, ces paramètres sont à la base des processus climatiques et microclimatiques qui déterminent les transferts d'énergie et de masse.

Le milieu urbain est constitué d'un patchwork de surfaces végétales, minérales et synthétiques ayant des propriétés radiatives, thermiques, aérodynamiques et hydriques très différents [Bouyer, 2009] assemblées dans une grande hétérogénéité géométrique. La configuration de cette surface urbaine et la distribution des surfaces vont donc caractériser en grand partie son microclimat.

1.2 CARACTÉRISATION DU FONCTIONNEMENT CLIMATIQUE DE LA VÉGÉTATION

1.2.1 Bilan énergétique de la végétation

Un des moyens de lutte contre l'ICU est l'utilisation des matériaux avec un albédo élevé ou une augmentation des surfaces végétalisées. L'effet direct de ces

mesures est d'altérer le bilan énergétique des surfaces et la demande de climatisation, ainsi le bilan énergétique à l'échelle de la ville est modifié (équation 1.1).

Le modèle du bilan énergétique des plantes est donné dans l'équation 1.2.

$$R_{abs} - \epsilon_s \sigma T_L^4 - C_p g_{Ha} (T_L - T_a) - G - \lambda E = 0 \quad (1.2)$$

Avec :

$g_{Ha} = 1.4 * 0.135 \sqrt{\frac{u}{d}}$: Paramètre permettant de représenter le flux de chaleur sensible de la végétation,

R_{abs} : rayonnement absorbé [$W.m^{-2}$],

ϵ_s : émissivité des feuilles,

σ : constante de Stefan Boltzmann [$5.67 * 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$],

T_L : température des feuilles [$^{\circ}C$],

T_a : température de l'air [$^{\circ}C$],

C_p : chaleur spécifique de l'air [$29.3 J.mol^{-1}.K^{-1}$],

G : densité de flux de chaleur,

λE : chaleur latente perdue [$W.m^{-2}$],

E : transpiration [$g.s^{-1}.m^{-1}$].

Dans le modèle de bilan énergétique des plantes, un pourcentage du rayonnement solaire est utilisé pour activer les fonctions biologiques (photosynthèses, transpiration, respiration CO_2). Le rayonnement absorbé¹ est donc converti en chaleur latente, une autre partie est convertie en chaleur sensible et, dans le cas de surfaces végétalisées, une partie peut être stockée dans le substrat.

La chaleur latente est la chaleur utilisée pour permettre les processus d'évaporation de l'eau accumulée au sol ou à la surface des feuilles et de transpiration de feuilles, on parle d'évapotranspiration (détaillé dans la section 1.3.2.1). La chaleur latente permet à la plante la dissipation de l'excès de chaleur à travers les feuilles. La variation de la chaleur latente au cours de l'année suit un comportement sinusoïdal, avec un pic à l'automne.

[Jim and Tsang, 2010] affirment que les pertes par chaleur latente sont plus importantes lorsque qu'il y a du soleil et peu d'humidité dans l'atmosphère.

1. L'énergie absorbée = l'énergie incidente – l'énergie réfléchie (fonction de l'albédo)

La figure 1.1 illustre les résultats des pertes par chaleur latente pour quatre jours représentatifs à Hong Kong sur une toiture végétalisée.

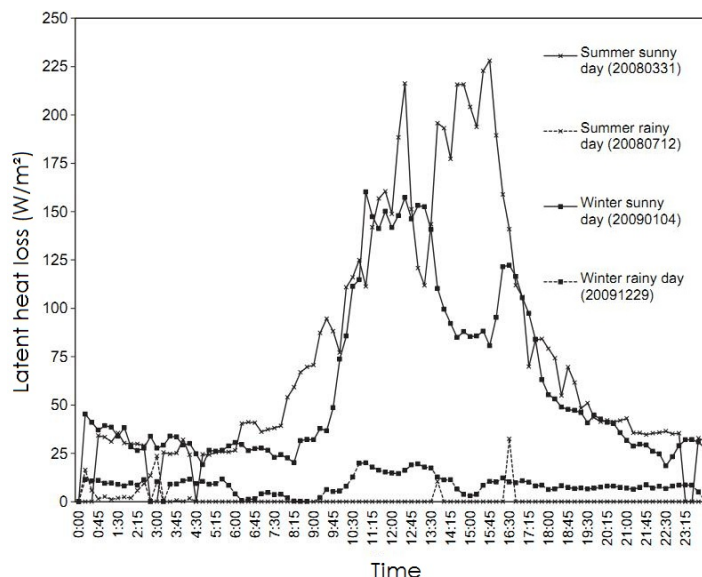


FIGURE 1.1: Pertes par chaleur latente dans 4 jours représentatifs à Hong Kong [Jim and Tsang, 2010]

La chaleur sensible est l'énergie qui est transférée entre la surface du sol ou des feuilles et l'atmosphère. Si la température de la surface est plus importante que celle de l'atmosphère, un flux d'énergie se produit vers l'environnement par convection. La chaleur stockée dans les matériaux est généralement libérée dans l'air ambiant pendant la nuit sous forme de chaleur sensible. [Jim and Tsang, 2010].

1.2.2 Paramètres influents sur le comportement de la végétation

1.2.2.1 Déficit de Vapeur de Pression VPD

Le déficit de vapeur de pression VPD^2 indique la capacité de l'air à retenir de la vapeur d'eau avant le point de rosée (saturation). Un VPD élevé désigne une capacité élevée de l'air à contenir de l'eau (sous forme de vapeur); cette condition permet de stimuler les transferts de vapeur d'eau dans l'air sous des conditions de basse humidité relative. Par conséquent un VPD bas indique que l'air est proche de la saturation (HR élevée) et qu'il n'a pas la capacité de recevoir de la vapeur d'eau provenant des feuilles ou des surfaces. Le VPD permet de tenir compte de l'humidité relative de l'air ainsi que de la température.

2. Vapour Pressure Deficit

Le VPD peut être défini aussi comme la différence entre la pression de vapeur partielle e et la pression de vapeur saturante e_{sat} pour une température donnée. (Voir Figure 1.2)

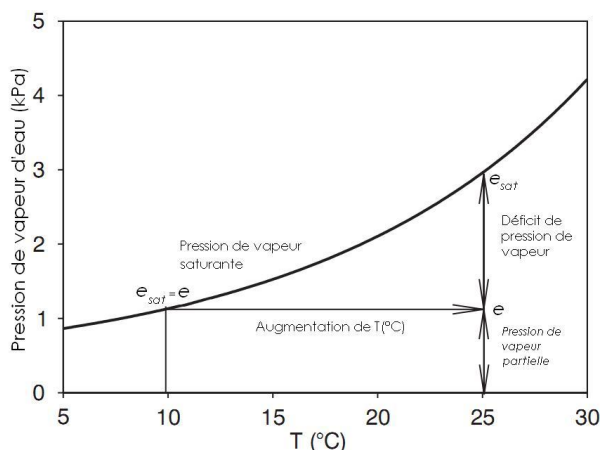


FIGURE 1.2: Déficit de vapeur de Pression VPD [Gil Pelegrín et al., 2005]

Le flux advectif et le flux par rayonnement font augmenter la transpiration des feuilles à condition que la quantité de flux d'énergie ne dépasse pas le seuil où les stomates³ se ferment. Il existe cependant, des espèces où les stomates se ferment lorsque le VPD est très élevé, faisant augmenter la température des feuilles. Ceci est un système de contrôle qui permet à la plante de modérer les pertes d'eau vers l'atmosphère.

1.2.2.2 Potentiel Hydrique ψ

Le potentiel hydrique ψ est considéré comme l'énergie qu'il faut fournir au système pour pouvoir extraire de l'eau; c'est pourquoi celui-ci prend une valeur négative. Ainsi l'eau va des zones de plus grand potentiel hydrique vers de zones de faible potentiel. ψ est donc une quantité d'énergie par unité de volume [$J.m^{-3}$], cependant il est plus utilisé par son équivalence dimensionnelle l'unité de pression [MPa]. [Gil Pelegrín et al., 2005] conseillent cependant d'utiliser cette dernière unité de mesure avec prudence.

1.2.2.3 Conductance stomatique g_s

La conductance stomatique g_s est une variable physique qui détermine le degré d'ouverture des stomates. La conductance stomatique permet à la plante

3. Les stomates sont de petits orifices (pores) situés essentiellement sur la face abaxiale des feuilles (face inférieure pour les espèces hypostomatiques), qui permettent les échanges gazeux de vapeur d'eau et CO_2 avec l'atmosphère. Ils ont une taille moyenne de 5 à $30\mu m$ et ne couvrent que 1 à 2% de la surface total de la feuille.

de répondre de manière active aux potentialités hydriques du *SPAC*⁴ et aux conditions environnementales [Tahi, 2008].

La régulation de la transpiration est donc liée à la conductance stomatique, c'est-à-dire à l'état des stomates.

1.2.2.4 Indice de surface foliaire LAI (Leaf Area Index)

L'indice foliaire de la canopée végétale est une grandeur adimensionnelle (m^2/m^2) qui représente la surface cumulée des faces supérieures des feuilles vertes par unité de surface du terrain [Gobron and Verstraete, 2009]. Le concept de LAI (largement utilisé en agro-météorologie) est un des paramètres nécessaires aux modèles qui cherchent à représenter le phénomène d'évapotranspiration et le comportement de la couverture végétal avec l'atmosphère. L'expression de cette grandeur est donnée dans l'équation 1.3.

$$LAI(z) = \int_z^H A_F(z) dz \quad (1.3)$$

Avec :

$LAI(z)$: Indice foliaire à la côte de référence z ($z = 0$ pour LAI_{global}),

$A_F(z)$: aire totale des faces supérieures à l'altitude z par unité d'aire de sol,

H : hauteur du couvert végétal.

Dans le bilan énergétique de la végétation en ville donné dans l'équation 1.2, une hypothèse doit être adoptée pour le calcul de la chaleur latente λE : les arbres sont entourés d'objets qui génèrent de l'ombre sur ceux-ci. Ainsi une partie de la surface foliaire est à l'ombre et une partie est ensoleillée. Dans ce cas le LAI total est la somme du LAI de la surface ensoleillée plus le LAI de la surface à l'ombre.

$$LAI_{total} = LAI_s + LAI_{sh} \quad (1.4)$$

LAI_s : Indice foliaire de la surface ensoleillée (*sunlit*),

LAI_{sh} : Indice de surface foliaire à l'ombre (*shaded*).

L'équation 1.5 permet de calculer le LAI des surfaces ensoleillées comme une fraction de LAI_{total} [Kjelgren and Montague, 1998].

4. Continuum sol-plante-atmosphère (section 1.2.3)

$$LAI_S = \frac{1 - e^{-\kappa LAI}}{\kappa}, \quad (1.5)$$

où κ est le coefficient de porosité du houppier. Ce coefficient est fonction de l'orientation des feuilles relative à la surface du sol.

Il est possible de calculer à partir du coefficient κ et du LAI le rayonnement global moyen $R_g(z)$ au sol ($z = 0$) sous la forme donnée dans l'équation 1.6 [Bouyer, 2009]. Celle-ci permet de représenter l'atténuation du rayonnement solaire à son passage dans la couche végétale, de manière exponentielle.

$$R_g(z) = R_{g,0} e^{-\kappa \cdot LAI(z)}, \quad (1.6)$$

Avec :

$$\kappa = \kappa_s = [(1 - \tau_t)^2 - \rho_t]^{1-2} \kappa_l \quad (1.7)$$

κ_s est le coefficient d'atténuation des arbres.

κ_l est le coefficient d'atténuation des feuilles.

τ_t est la transmittance et ρ_t est la réflectance du tissu de feuilles.

$R_{g,0}$ est le rayonnement global au sommet de la végétation [$W.m^{-2}$]. La figure 1.3 illustre les simulations de rayonnement solaire transmis pour différentes valeurs de LAI .

Les effets directs de la végétation sur la consommation énergétique des bâtiments, sont aussi liés à une perte de charge sur la vitesse du vent. L'indice de surface foliaire LAI comme un indicateur des propriétés structurales des arbres, permet de prendre en compte cet effet en ajoutant à l'équation de quantité de mouvement un terme de perte de charge (terme de puits) donné dans l'expression simplifiée 1.8 [Bouyer, 2009] :

$$S_{vi} = -\rho_{air} C_d LAI \|\vec{v}\| v_i \quad (1.8)$$

Où :

S_{vi} : Composant de puits de mouvement,

C_d : Coefficient de traînée aérodynamique. Ce coefficient dépend de la forme, de sa dimension et de l'inclinaison des ses feuilles,

ρ_{air} : Masse volumique de l'air.

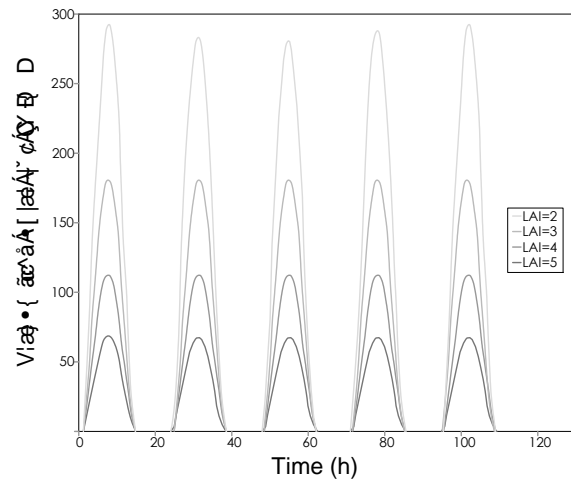


FIGURE 1.3: Effet du LAI sur le rayonnement solaire transmis [Palomo del Barrio, 1998]

1.2.3 *Le continuum sol-plante-atmosphère SPAC*

Le modèle continuum sol-plante-atmosphère SPAC (J. R. Philip, 1966) fait référence au mouvement de l'eau à travers la plante. Le flux d'eau dans les végétaux est un processus dynamique, celui-ci traverse la plante et ses différentes parties jusqu'à l'atmosphère. L'eau pénétrant dans le sol traverse différents niveaux successifs au long de la plante avant d'arriver à l'atmosphère [Guyot, 1997] (Voir Figure 1.4) :

- Mouvement de l'eau dans le sol vers les racines,
- Absorption de l'eau du sol par les racines,
- Écoulement de l'eau des racines vers les parties aériennes à travers le système conducteur (les tissus des xylèmes),
- Diffusion à travers les espaces intercellulaires et les stomates des feuilles,
- Diffusion de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Dans la figure 1.4, les deux extrêmes sont à la base de la force motrice permettant le transport de l'eau à travers la plante : *le sol* comme source et *l'atmosphère* comme récepteur. La quantité d'eau transpirée par les plantes est donc proche de celle qui est absorbée par les racines (en condition de croissance, l'eau absorbée est légèrement plus élevée que l'eau transpirée [Gil Pelegrín et al., 2005]).

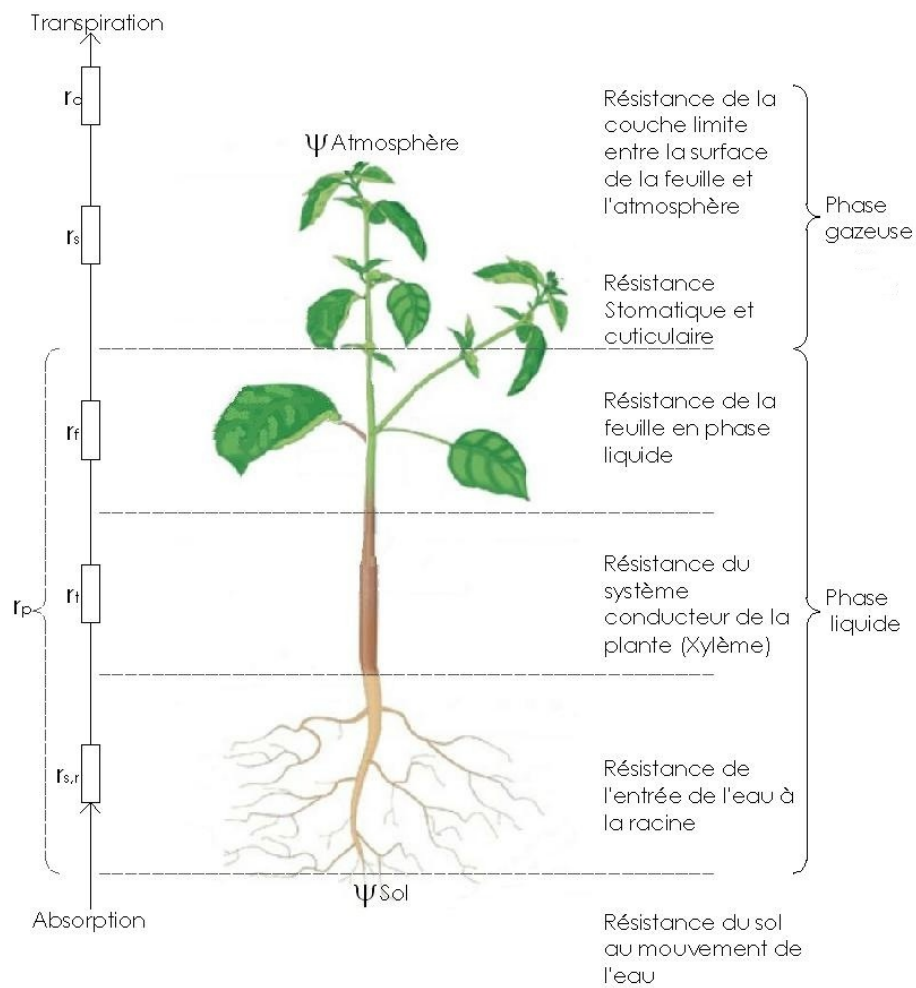


FIGURE 1.4: Représentation du modèle SPAC par analogie électrique (Adaptée de [Guyot, 1997])

Le continuum SPAC est déterminé par les conditions suivantes [De Gaspérin, 2006] :

- L'état hydrique du sol définit en grande partie le flux de l'eau vers la racine de la plante. Le taux de mouvement est donc une conséquence du gradient du potentiel hydrique ψ_s , plus une constante de proportionnalité K ou conductivité hydrique du sol (fonction du type de sol). Il est possible de calculer le potentiel hydrique du sol en fonction du volume d'eau contenu dans celui-ci à travers la fonction 1.9 donnée par [Jim and Tsang, 2010].

$$\psi_s = \psi_{s,p} \left(\frac{w_{g,s}}{w_g} \right)^b \quad (1.9)$$

Avec :

$\psi_{p,s}$: potentiel hydrique du sol lorsque celui-ci est saturé,

w_g : contenu volumétrique d'eau du sol,

$w_{g,s}$: contenu volumétrique maximal d'eau du sol,

b : Paramètre d'ajustement.

- L'état hydrique de l'atmosphère définit l'intensité du gradient à travers le végétal. Si la vapeur d'eau dans l'atmosphère se comporte comme un gaz parfait, et si la pression de vapeur partielle e est égale à la pression de vapeur saturante e_{sat} , les phases liquide-vapeur sont dites en équilibre. La valeur de pression de vapeur saturante est fonction de la température, c'est-à-dire que si la température de l'atmosphère augmente de manière isobare, il aura une rupture de l'équilibre liquide vapeur.
- Le flux d'eau à l'intérieur de la plante est assuré par le tissu xylémique, lequel diffère selon les familles d'espèces. Le xylème est constitué des éléments vaisseaux et de trachéides dans le cas des espèces feuillues, tandis que dans les conifères les xylèmes ne sont composés que de trachéides. Les trachéides sont de cellules allongées lignifiées, connectées à leurs extrémités par des espaces pointus par lesquels circule l'eau. Ainsi, le flux rencontre une résistance plus élevée à son passage dans le cas des espèces conifères. Les vaisseaux sont formés des éléments cellulaires plus courts et larges, connectés dans leurs extrémités de manière directe (moins de résistance sur une longueur considérable du xylème chez les espèces de feuillus). La loi de Hagen-Poiseuille (1.10) permet de mieux comprendre l'influence de la physionomie du tissu xylémique et la taille de ces composants dans le flux :

$$\Phi = \frac{\pi r^4}{8\eta} \left(\frac{-\delta P}{\delta t} \right) \quad (1.10)$$

Avec :

$\frac{-\delta P}{\delta t}$: Gradient de pression,

η : Viscosité dynamique de l'eau [Mpa.s] .

- Dans la dernière étape du continuum, les échanges produits entre les feuilles et l'atmosphère sont gouvernés par les stomates. Le flux est transformé d'un état liquide à un état vapeur dans les parois cellulaires du mésophylle et de la cuticule, puis il devient partie de l'atmosphère interne de la feuille. Dans cette partie, les échanges plante-atmosphère sont produits à travers les *stomates* et dans une moindre proportion à travers

la cuticule de l'épiderme foliaire. La transpiration stomatique représente 90% de la transpiration totale journalière, tandis que la transpiration cuticulaire ne correspond qu'aux 10% restants.

La résistance au niveau des stomates est variable ; elle est contrôlée par le végétal par rapport aux cycles journaliers et stationnaires. Ce mécanisme de contrôle actif du flux de transpiration permet à la plante d'éviter l'endommagement de ses parties et des tensions extrêmes dans les xy-lèmes. A l'inverse de la résistance, la conductance stomatique g_s est plus couramment utilisée (voire section 1.2.2.3).

1.2.3.1 Le modèle SPAC par analogie électrique

Humber (1928) et Van den Honert (1948) ont proposé un modèle basé sur l'analogie électrique et la loi d'Ohm. Celui-ci fait allusion au mouvement de l'eau à travers la plante par analogie électrique [Gil Pelegrín et al., 2005]. Dans ce modèle on parle alors en termes de capacités et de résistances connectées en série. Le flux à travers le végétal est directement proportionnel à l'amplitude du gradient du potentiel entre les deux extrêmes et inversement proportionnel à la somme de ses résistances. La force motrice du mouvement de l'eau à l'intérieur de la plante et entre celle-ci et l'atmosphère est le gradient de potentiel hydrique ψ . Ce potentiel hydrique représente la capacité au mouvement des molécules d'eau qui dépend à son tour de l'énergie libre spécifique de l'eau.

Les résistances aux différents niveaux de la plante lui permettent de contrôler le flux d'eau à l'intérieur et les pertes au-delà des standards biologiques ou d'éviter des états irréversibles pour des écarts de ψ trop élevés. La résistance stomatique est la résistance variable qui permet à la plante ce type de contrôle. La somme de résistance dans la phase liquide est de 50 à 100 fois plus élevée que dans la phase gazeuse. Cela est dû aux écarts de $d\psi$ entre les deux phases.

Le modèle SPAC donné dans l'équation ci-après, est exprimé par analogie électrique comme le quotient d'une différence de potentiel hydrique $d\psi$ par la résistance aux transferts hydriques [Guyot, 1997] :

$$\Phi_w = \frac{d\psi}{r} \quad (1.11)$$

L'équation 1.11 exprimée dans les différentes parties de la plante devient :

$$Absorption = \frac{\psi_s - \psi_r}{r_{sol,r}} = \frac{\psi_r - \psi_f}{r_p} = \frac{\psi_f - \psi_a}{r_s + r_a} = Transpiration \quad (1.12)$$

r_a : Résistance atmosphérique,

r_p : Résistance interne de la plante,

r_s : Résistance stomatique,

$r_{sol,r}$: Résistance au passage du sol aux racines,

ψ_a : Potentiel hydrique de la vapeur de l'eau de l'air,

ψ_f : Potentiel hydrique des feuilles,

ψ_r : Potentiel hydrique des racines,

ψ_s : Potentiel hydrique du sol.

Avec des différences du potentiel hydrique ψ de l'ordre de :

$-\psi_s + \psi_r \approx 0.1$ à $1MPa$ Phase liquide

$-\psi_r + \psi_f \approx 0.5$ à $3MPa$ Phase liquide

$-\psi_f + \psi_a \approx 50$ à $100MPa$ Phase gazeuse

1.2.3.2 Comportement des plantes sous différentes conditions

Au sol

- *Sol humide (Teneur en eau optimal)* : le potentiel hydrique du sol ψ_s est proche de sa valeur maximale. Le potentiel hydrique au niveau des feuilles ψ_f est légèrement plus petit et les stomates sont complètement ouverts, favorisant le flux de transpiration.
- *Sol peu humide* : il se produit une baisse du potentiel hydrique du sol, ce qui entraîne une baisse du flux d'eau vers la partie aérienne de la plante et donc du potentiel foliaire. Ici les stomates se ferment à partir d'un potentiel hydrique ψ seuil. Cette condition n'est cependant pas la seule qui détermine l'ouverture ou la fermeture des stomates, d'autres conditions liées à la valeur du VPD de l'air et aux flux de rayonnement interviennent.
- *Sol relativement sec* : le potentiel hydrique des racines et des feuilles est relativement bas, ce qui entraîne une fermeture partielle des stomates.

Dans les feuilles

Au niveau des feuilles, les stomates gouvernent le flux d'eau et les échanges entre la plante et l'atmosphère (voir Figure 1.5).

C'est donc à travers les stomates que la transpiration a principalement lieu. Lorsque la disponibilité de l'eau aux racines est limitée, le stomates se ferment (effet à court terme) et la transpiration diminue.

La régulation des échanges de CO_2 de la photosynthèse et de la vapeur d'eau fait l'objet de plusieurs recherches. Malgré la quantité d'expériences et d'approches par modélisation pour préciser le mécanisme de réponse des stomates aux conditions environnementales, il reste encore beaucoup de choses à explorer [Guyot, 1997].

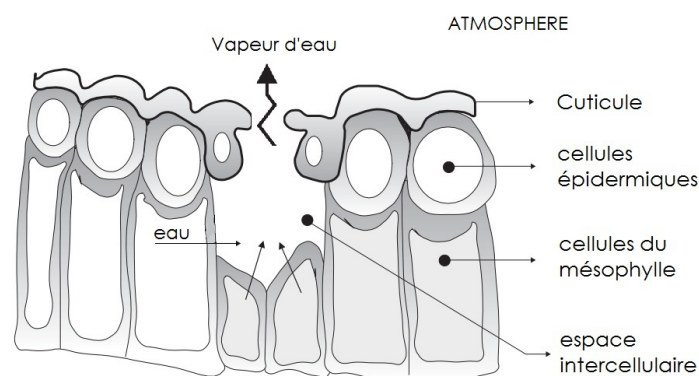


FIGURE 1.5: Représentation schématique d'un stomate [Allen et al., 2006]

L'ouverture et la fermeture des stomates est principalement gouvernée par la concentration en CO_2 dans l'air et dans la chambre sous-stomatique et le potentiel hydrique du sol ψ_{sol} . Cependant les facteurs ci-après peuvent aussi contrôler le fonctionnement des stomates [Guyot, 1997] :

- Une réaction hormonale : la production de l'acide abscissique ou ABA (hormone végétal) au niveau des racines commande aussi la fermeture des stomates.
- La turgescence des cellules de garde.
- Le rayonnement incident : hauteur du soleil et position de la feuille dans le couvert (Voir Figure 1.7).
- La température des feuilles (Voir Figure 1.7).
- L'humidité de l'air.
- La vitesse du vent. Une augmentation de la vitesse de l'air fait croître le taux de transpiration par unité de surface foliaire en diminuant la résistance de la couche limite entre celle-ci et l'atmosphère.

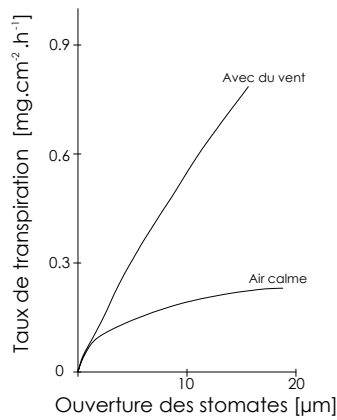


FIGURE 1.6: Taux de transpiration de la végétation en fonction du vent [Medina R, 2011]

- le stress hydrique⁵ : La réponse de la plante à cette condition dépend de ses caractéristiques (stade de développement, organismes et tissus) et du type de stress.

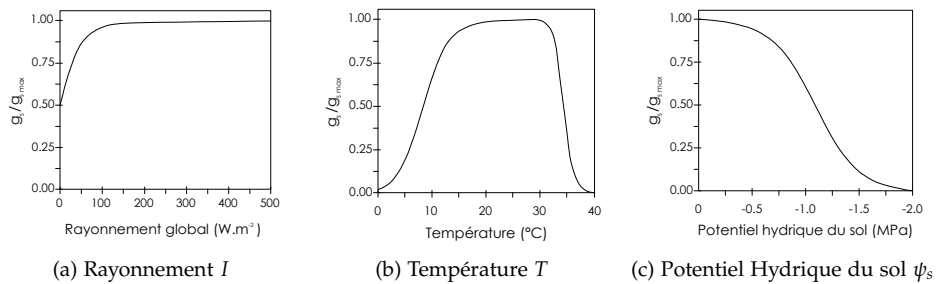


FIGURE 1.7: Représentation schématique des mécanismes de fonctionnement de conductivité des stomates en fonction des différents facteurs climatiques [Guyot, 1997]

1.3 EFFET DE LA VÉGÉTATION SUR LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS

Les effets de la végétation sur l'environnement urbain peuvent être évalués sur des aspects différents : effet thermique sur l'hydrologie, sur la qualité de l'air, sur la qualité du cadre de vie, sur la biodiversité. Un des objectifs de ce

5. Stress subi par la plante sous des conditions climatiques et environnementales particulières où la quantité d'eau transpirée est supérieure à la quantité d'eau absorbée. Le stress hydrique est défini entre autres par son intensité et durée.

travail est d'évaluer l'impact direct et indirect produit par la végétation sur le microclimat et sur la consommation énergétique des bâtiments.

Du point de vue climatique, l'effet de la végétation est d'éviter une augmentation de la température de l'air et générer une atténuation de l'ICU. La diminution de la température est produite par l'effet indirect de l'ombre, mais aussi par l'effet direct de l'évapotranspiration des plantes. La mitigation de l'ICU à travers de zones vertes, arbres, masses végétales ou masses d'eau est connue sous le nom d'effet oasis. Un exemple a été observé au parc Golden Gate de San Francisco avec des atténuations de la température allant jusqu'à -8°C par rapport aux zones urbaines en absence de la végétation [Sanchez de la Flor, 2002].

Cette baisse de température de l'air générée dans le microclimat, aura à son tour un effet sur la consommation énergétique des bâtiments. On parle dans ce cas des effets indirects de la végétation. La végétation peut également modifier les flux de chaleur au niveau de l'enveloppe du bâtiment. A travers l'ombrage, le rayonnement solaire arrivant sur les façades est fortement affaibli. Les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiments sont alors limités, générant ainsi un effet direct sur la consommation énergétique de bâtiments.

1.3.1 Effets Directs

L'effet direct de la végétation sur la consommation énergétique des bâtiments est lié à l'interception du rayonnement solaire et aux variations générées sur les écoulements d'air. Les transferts thermiques sont modifiés généralement par :

- diminution des gains de chaleur du fait de l'ombre sur les fenêtres, murs et toitures,
- réduction des échanges grande longueur d'onde *GLO* avec la voûte céleste,
- diminution des échanges par convection : la végétation génère une barrière contre le vent.

Dans l'équation 1.2 du modèle du bilan énergétique de la végétation, R_n et $\epsilon_s \sigma T_L^4$ permettent de représenter l'effet direct de la végétation lié au flux par rayonnement. Le rayonnement global net qui atteint les feuilles est donné dans l'équation 1.13 [Kjelgren and Montague, 1998].

$$R_n = \alpha_l (S \downarrow + S \downarrow_d + S \uparrow) + (L \downarrow + L \uparrow) - (2\epsilon_l \sigma T_l^4) \quad (1.13)$$

Avec :

α_l : Absorption des feuilles ($\alpha_l = I(1 - a)$). I étant le rayonnement incident et a l'albédo des feuilles,

$S \downarrow$: rayonnement CLO entrant sur les surface horizontales,

${}^0S \downarrow$: rayonnement solaire direct CLO reçu par les feuilles. Pour une surface à l'ombre ${}^0S \downarrow$ est égale à 0,

$S \downarrow_d$: rayonnement CLO diffus (supposé égale à 18% de ${}^0S \downarrow$),

$S \uparrow$: rayonnement CLO réfléchi par la surface sous-jacent,

$L \downarrow$: rayonnement GLO⁶ reçu,

$L \uparrow$: rayonnement GLO émis des surfaces,

σ :constate de Stefan-Boltzman,

$2\epsilon_l\sigma T_l^4$: rayonnement GLO des deux cotés des feuilles, l'émissivité des feuilles est généralement supposée égale à 0.95

Les paramètres permettant de mesurer les effets directs de la végétation sont liés à :

- Transmissivité du rayonnement solaire
- Albédo
- Emissivité IRT
- Perméabilité

1.3.1.1 Transmissivité du rayonnement solaire

La transmissivité est l'effet de la végétation sur la transmission de la lumière du soleil. Ce paramètre selon saison. Sa valeur détermine l'effet de l'ombre sur les surfaces du bâtiment et sur le sol. Pour les arbres feuillus, la valeur prise dans les modèles est souvent la plus petite (= 0.15 en été).

Comme il a été montré dans la section 1.2.2.4, il est possible de calculer la valeur de la transmissivité du rayonnement Courte longueur d'onde CLO à partir du LAI et du coefficient d'extinction⁷ κ_s des arbres. Ce dernier paramètre est à son tour fonction des propriétés optiques des feuilles et du coefficient

6. Grande longueur d'onde

7. Le coefficient d'extinction est aussi connu comme coefficient d'atténuation

d'extinction κ_l des feuilles (fonction de sa distribution. Ses valeurs sont détaillées dans l'annexe A.3). L'expression de transmissivité à partir du LAI est donnée dans l'équation 1.5 [Palomo del Barrio, 1998].

1.3.1.2 Albedo

L'albédo est la propriété thermique des matériaux qui permet de mesurer le rayonnement solaire réfléchi par rapport au rayonnement solaire incident. Les valeurs moyennes de l'albédo pour la végétation varient entre 0.20 et 0.30. Pour les espèces végétales qui se trouvent dans des climats secs et chauds, la valeur moyenne de l'albédo est généralement la plus élevée. La valeur de ce paramètre varie aussi en fonction de la saison en raison de la couleur des feuilles (lorsque les feuilles deviennent plus rouges, la valeur de l'albédo décroît).

1.3.1.3 Emissivité IRT

L'émissivité IRT⁸ ϵ_l est une propriété thermique des matériaux qui désigne en GLO le rapport de l'énergie rayonnée et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température [Hervé, 2005]. Les valeurs de l'émissivité de la végétation sont très élevées.

Des ordres de grandeur pour les arbres des paramètres décrits précédemment sont donnés dans le tableau 1.1. Des valeurs moyennes de albédo et de l'émissivité d'arbres, de la pelouse et des forêts sont données dans le tableau 1.2.

	Réflectivité	Absorptivité	Transmissivité	Emissivité
	ρ_l	α_l	τ_l	ϵ_l
<i>Eté</i>	0.30	0.50	0.15-0.20	0.97
<i>Hiver</i>	0.15	0.15	0.70-0.80	0.97

Tableau 1.1: Propriétés solaires et thermiques moyennes des feuillage d'arbres [Bouyer, 2009]

	<i>Solar albedo</i>	<i>Emissivity</i>
<i>Leaves</i>	0.20	0.95
<i>Trunk</i>	0.15	0.90
<i>Grass (short)</i>	0.26	0.95
<i>Forest Deciduous</i>	0.15 - 0.20	0.97 - 0.98
<i>Forest Coniferous</i>	0.05 - 0.15	0.97 - 0.99

Tableau 1.2: Valeurs globales d'albédo et d'émissivité de la végétation [Vinet, 1999]

8. Infrarouge thermique

1.3.1.4 Perméabilité

La perméabilité est un paramètre non thermique utile pour caractériser les effets directs de la végétation sur les écoulement d'air. Ce terme est utilisé pour mesurer l'impact de la végétation sur la vitesse du vent. Certains auteurs utilisent également le terme de porosité⁹ pour désigner l'effet de brise-vent dû à la végétation. [André Vézina, 2001]

1.3.1.5 Autres paramètres

Dans le cas des toitures et murs végétalisés, d'autres paramètres liés au flux par conduction doivent être pris en compte pour caractériser les effets directs dus au substrat. Il existe de l'information abondante par rapport aux propriétés thermiques des matériaux classiques de construction, mais très peu concernant les substrats. Il est possible cependant d'en tirer des conclusions et de les appliquer aux propriétés des substrats. Les propriétés thermiques les plus importantes sont rapidement décrites ci-après. Les caractéristiques du matériau par rapport à certaines conditions sont données dans la table 1.3.

- **Conductivité thermique λ** : Pour un matériau, c'est le flux de chaleur qui traverse la couche par m^2 de surface, généré par une différence de température de 1°C entre les deux surfaces. Elle est donnée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$.
- **Résistance thermique R** : Caractérise la capacité d'isolation en limitant le passage du flux de chaleur. La résistance thermique fait intervenir l'épaisseur de la paroi ou du matériau mais aussi son λ ($R = 1/\lambda$). Elle est donnée en $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$.
- **Capacité thermique calorifique Cp** : Quantité de chaleur que peut emmagasiner un matériau par rapport à son volume. C'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température d'un matériau de 1m^3 . Elle est donnée en $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$.
- **Diffusivité thermique α** : Caractérise l'inertie thermique du matériau. C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps Elle fait intervenir la conductivité thermique λ et la capacité thermique Cp : $\alpha = \lambda/Cp$. Elle est donné en $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.
- **Effusivité thermique Ef** : Caractérise aussi l'inertie du matériau. Indique la capacité d'un matériau à absorber ou restituer plus au moins rapidement un apport de chaleur. L'effusivité caractérise la sensation de chaud ou froid que donne un matériau. Elle est donnée en $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$.

9. La porosité est définie comme le rapport entre la surface occupée par les vides et la surface totale exposée au vent (dans le plan perpendiculaire au vent).

<i>Propriétés thermiques</i>	<i>Condition</i>	<i>Caractérisation du matériau</i>
<i>Conductivité thermique</i>	Si $\lambda \uparrow$	Le matériau facilite le transfert thermique
<i>Résistance thermique</i>	Si $R \uparrow$	Matériau isolant
<i>Capacité thermique/calorifique</i>	Pour un même volume, si $C_p \uparrow$	Plus grande sera la quantité d'énergie échangée.
<i>Diffusivité thermique</i>	Si $\alpha \downarrow$	Plus le front de chaleur mettra du temps à travers le matériau. Inertie thermique $IT \uparrow$
<i>Effusivité thermique</i>	Si $E_f \uparrow$	Le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement en surface (métal, pierre). $IT \downarrow$
	Si $E_f \downarrow$	Le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur (bois, isolant). $IT \uparrow$

Tableau 1.3: Caractéristiques des matériaux en fonction des conditions des propriétés thermiques

1.3.2 Effets Indirects

Les effets indirects de la végétation sur la consommation énergétique des bâtiments sont liés principalement à la modification de la température et de l'humidité de l'air du microclimat. Ces effets sont dû essentiellement aux phénomènes d'évapotranspiration. Pour illustrer les effets de ce phénomène, un arbre moyen peut évaporer jusqu'à 1460kg d'eau et puiser 860MJ à l'environnement par jour pour effectuer cette évapotranspiration¹⁰.

10. TAREB «Énergie de l'environnement urbain-Architecture basse énergie» chapitre 4, p11. consulté sur http://new-learn.info/learn/packages/tareb/docs/lea/lea_ch4_fr.pdf le 20 août 2011

1.3.2.1 *Evapotranspiration*

L'évapotranspiration (*ET*) est le procès d'évaporation de l'eau sur une surface, et de transpiration des plantes. La plupart des études réalisées sur la transpiration des plantes font intervenir la combinaison des deux processus, car il est difficile d'évaluer la transpiration et l'évaporation des plantes séparément.

L'évaporation est le phénomène de changement de phase à travers lequel l'eau en état liquide est transformée en état gazeux. Une quantité d'énergie est donc requise pour que ce changement de phase ait lieu. Le rayonnement solaire direct et la température de l'air (dans une pourcentage moins important) fournissent cette énergie. Le phénomène d'évaporation dans l'atmosphère est aussi déterminé par la quantité d'humidité contenue dans l'air et par la vitesse du vent. Lorsque l'air devient saturé en humidité les procès évaporatifs sont réduits ou stoppés [Allen et al., 1998]. Le phénomène d'évaporation est aussi régi par la différence de pression de vapeur d'eau VPD entre la surface et l'air environnant.

Lorsque la surface évaporative est un substrat, la capacité de champ ou capacité de rétention maximale en eau du sol devient un facteur qui affecte le phénomène d'évaporation.

La Transpiration est le phénomène par lequel la plante évacue à travers les stomates l'eau contenue dans le tissu des feuilles. La transpiration permet aux feuilles de dissiper une partie de l'énergie reçue sous forme de chaleur latente, cela afin de limiter le réchauffement.

La transpiration dépend directement des facteurs climatiques tels que l'énergie fournie, la pression de vapeur et le vent, mais aussi du potentiel hydrique du sol. Les paramètres d'influence cités précédemment varient de manière différente dans chaque espèce et pour chaque condition environnementale. Le phénomène de transpiration est donc différent pour chaque espèce de plante et il est difficile de définir un type de comportement [Allen et al., 1998].

La transpiration fait partie du processus de circulation de l'eau à travers la plante. Ce circuit ou flux d'eau est ouvert par rapport au milieu environnant, il est connu comme le *continuum sol-plante-atmosphère* (*CSPA* ou *SPAC*). Le modèle CSPA est expliqué dans la section 1.2.3.

Différentes études ont été réalisées pour estimer les besoins en eau des cultures à travers de la notion d'évapotranspiration. Ceci a conduit à la définition de différents termes d'évaporation et d'évapotranspiration [Guyot, 1997] et [Allen et al., 2006] :

- **Évaporation Potentielle (EP)** : La première notion introduite dans ce terme a été celle de Thornthwait en 1948 comme évapotranspiration potentielle qui postérieurement a été définie comme évaporation potentielle. Elle correspond à l'évaporation d'une surface végétale, lorsque celle-ci

est couverte en totalité d'eau et donc en saturation. Le EP est un concept théorique qui représente la valeur maximale possible d'évaporation dans des conditions climatiques données.

- **Évaporation potentielle théorique (EP^*)** : Valeur maximale de EP fonction des apports énergétiques des facteurs climatiques et indépendantes des caractéristique de la surface et de la végétation. Une approche pour déterminer EP^* est celle de Pennan (1948) (équation 1.16).
- **Évapotranspiration réelle (ETR)** : Ce grandeur correspond à la valeur réelle évaporée des surfaces et de la transpiration de la végétation. Elle dépend des conditions climatiques (bilan radiatif et vent), de la résistance du transfert d'eau de la surface vers l'atmosphère (résistance stomatique principalement) et des caractéristiques de la partie aérienne des couverts végétaux (étendue, hauteur, disposition des feuilles dans l'espace).
- **Évapotranspiration réelle maximale (ETR_M ou ET_M)** : Celle-ci représente la valeur de ETR sous des conditions de résistance stomatique minimales. ETR_M permet de mesurer la valeur optimale d'hydratation d'une culture. Lorsque les stomates sont complètement ouverts, l'évapotranspiration est maximale et non potentielle du fait de la résistance que présente la surface des feuilles (liée à sa géométrie).
- **Évapotranspiration de référence (ET_0)** : Cette grandeur permet de calculer l'évapotranspiration maximale à partir d'une culture de référence, celui d'un gazon. Elle est alors indépendante du type de culture ou végétation. Il est possible de calculer la valeur de ET_0 à travers de l'équation par régression de Jensen-Haise (1963) qui met en relation l'évapotranspiration, la température moyenne de l'air T_a et le rayonnement solaire incident R_s ou absorbé :

$$ET_0 = (0.0252T_a - 0.0078)R_s \quad (1.14)$$

$$ET_0 = 0.8(0.0252T_a - 0.0078)I \quad (1.15)$$

$R_s=I$, si l'on prend un albédo (a) égal à 0.2, le rayonnement solaire absorbé sera égal à $I(1 - a)$.

L'évapotranspiration varie en fonction des paramètres liés aux caractéristiques de la végétation, du strate et des conditions environnementales qui sont expliquées dans la section 1.2.2.

[Dimoudi and Nikolopoulou, 2003] affirment que pour une plante typique de feuillus, le taux d'évapotranspiration est plus élevé pour des grandes vitesses de vent lorsque les températures sont supérieures à 25°C , mais plus

élevé pour les petites vitesses lorsque la température est en dessous de 25°C. Le taux d'évapotranspiration augmente en fonction de la température jusqu'au seuil proche de 25°C (Figure 1.8). L'effet de l'évapotranspiration est minimal pendant la période de chaleur, particulièrement quand la vitesse du vent diminue. Lorsque la vitesse du vent croît, la température des feuilles décroît vers une température proche de celle de l'air.

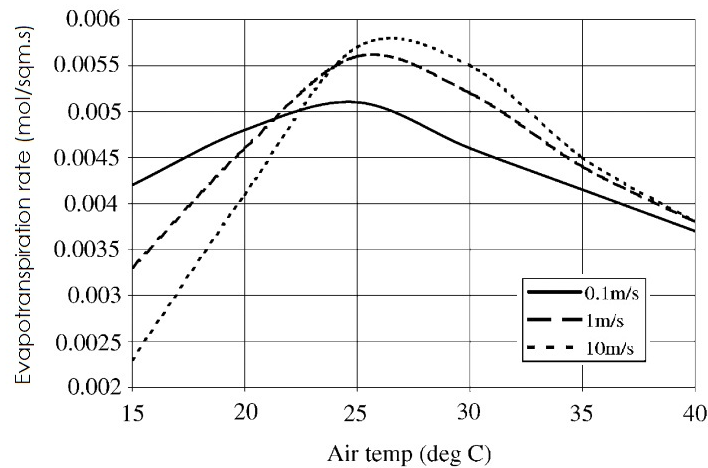


FIGURE 1.8: Variation de l'évapotranspiration des feuilles pour différentes vitesses de vent [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]

Détermination du débit d'évapotranspiration

Dans le bilan énergétique donné dans l'équation 1.2, il est nécessaire d'estimer le potentiel théorique d'évapotranspiration, lequel peut être obtenu à partir de EP^* . Une première approche est possible par le biais de l'équation de Penman 1.16.

$$EP^* = \frac{\Delta \frac{R_n}{L} + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (1.16)$$

Avec :

E_a : Capacité évaporatoire de l'air,

γ : constante psychrométrique,

Δ : pente de la courbe pression vapeur saturant,

A partir de l'équation 1.16, en tenant compte de la résistance aérodynamique, de la résistance des stomates et de la résistance de la canopée, on

obtient la valeur de l'évapotranspiration [Guyot, 1997].

$$ETR = \frac{EP^*}{1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{r_c + r_s}{r_a}} \quad (1.17)$$

Le modèle du bilan énergétique de Penman-Monteith permet de mettre en relation directe des paramètres de caractérisation de la végétation (section 1.2.2) tels que le VPD , g_s et LAI pour calculer le débit de transpiration.

$$\lambda E = \frac{\nabla R_n^{s,sh} + \rho c_p \cdot \frac{e_a}{r_a}}{\nabla + \gamma \left(2 + \frac{r_s^{s,sh}}{r_a}\right)} \quad (1.18)$$

Avec :

$$E = E_{total} = E_s \frac{LAI_s}{LAI_{total}} + E_{sh} \frac{LAI_{sh}}{LAI_{total}} \quad (1.19)$$

λ : Chaleur latente d'évaporation [$J \cdot g^{-1}$],

E : débit de transpiration [$g \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$] par unité de surface de feuille,

$R_n^{s,sh}$: flux net de rayonnement [$W \cdot m^{-2}$],

e_a : VPD au niveau de la canopée végétal,

$r_s^{s,sh}$: résistance moyenne des stomates ou $1/g_s$ (g_s est la conductance stomatique) [$s \cdot m^{-1}$],

γ : constante psychrométrique [$66.2 Pa \cdot ^\circ C^{-1}$],

C_p : chaleur spécifique ou capacité thermique massique [$J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$],

ρ : densité de l'air [$g \cdot m^{-3}$],

∇ : pente de la courbe de pression de vapeur de saturation à la température T [$Pa \cdot ^\circ C^{-1}$],

r_a : résistance totale de la couche à la limite des feuilles [$s \cdot m^{-1}$].

CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS

2.1 PRÉSENTATION DES DISPOSITIFS VÉGÉTAUX

Un des objectifs du présent rapport est d'identifier les effets directs et indirects des dispositifs végétaux sur la consommation énergétique des bâtiments. Grâce aux recherches réalisées dans ce domaine il a été possible de faire une approche sur le comportement de la végétation face à certaines conditions. Les paramètres qui déterminent la performance énergétique des dispositifs ont été identifiés. Les résultats qui seront montrés ci-après ne sont cependant pas transposables, vu qu'ils sont attachés à des conditions particulières du lieu et de son climat, mais aussi à la configuration du dispositif proprement dit.

Espace d'intervention	Dispositif végétaux		Couverture végétale/strate végétal	Effet	
				Direct	Indirect
Toiture (Paroi Horizontale)	Toiture Végétale Intensive		herbacée	■	■
			arbusive		
			arborée		
	Toiture végétale extensive		herbacée	■	■
		arbusive			
Façade (Paroi Verticale)	Façade végétale	Revêtement	herbacée	■	■
		Brise-soleil			
		Élément de façade			
	Arbres d'alignement		Arborée	■	■
Sol	Masse végétale	Parc	Herbacée	■	■
			Arbusive		
			Arborée		
		Jardin (Non traité dans le cadre de ce travail)	Herbacée		
			Arbusive		
			Arborée		
Effet du dispositif sur la consommation énergétique					
■ Significatif					
■ Peu significatif					

Tableau 2.1: Classification des Dispositifs végétaux

La table 2.1 expose les dispositifs végétaux qui sont étudiés, l'espace d'intervention (parois verticales, parois horizontales ou l'espace environnant), ainsi que les effets directs et indirects sur la consommation énergétique des bâtiments. Les résultats des recherches, exposés ci après extraits de la bibliographie, sont issus des expériences et de simulations. Ces résultats ont permis de caractériser les dispositifs végétaux et d'en tirer des conclusions pour l'application dans des scénarios sous des critères énergétiques et climatiques.

2.1.1 Toiture végétale

Les études réalisées jusqu'à présent sur les toitures végétales (intensives et extensives) se sont d'avantage orientées sur les avantages du rafraîchissement que sur les économies d'énergie atteintes. Par ailleurs, on trouve plus d'information sur les bénéfices en été et très peu d'information sur le comportement en hiver de ces systèmes. La figure 2.1 illustre en coupe les types de toiture végétale et leurs compositions.

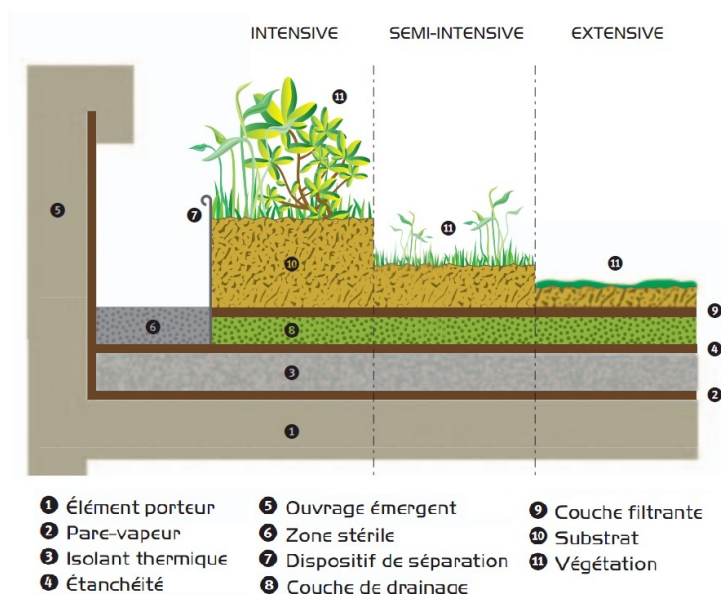


FIGURE 2.1: Coupe des toitures Intensives, semi-intensives et extensives. Extrait de <http://www.adopta.fr/site>

2.1.1.1 Toiture végétale Extensive

[Niachou et al., 2001] ont réalisé une étude par expérimentation et par approche mathématique sur les propriétés thermiques des toitures végétales extensives avec et sans isolation et sur l'impact que celles-ci ont sur la consommation énergétique du bâtiment. Une campagne de mesure a été réalisée en Athènes (Grèce) en 2000. Dans une première partie de l'étude, des mesures de la température de surface ont été réalisées à l'extérieur et à l'intérieur (avec un thermomètre et une caméra infrarouge) sur deux types de toitures : une végétalisée et l'autre non végétalisée.

Les résultats obtenus avec la caméra infrarouge ont permis de mettre en évidence les effets de la couleur des feuilles et de la surface non végétalisée. A partir de ces mesures, les propriétés radiatives d'émissivité des toitures végétalisées ont été déterminées. D'autre part, les résultats des températures

de surfaces présentent une variation significative d'un matériau à l'autre et entre la même surface végétal (fonction dans ce cas du type de sol, des plantes et de la pelouse), avec des écart de température qui allaient jusqu'à 10°C entre les deux toitures (avec et sans végétation). Les fluctuations des températures moyenne journalières dans une toiture végétalisée variaient de 4°C, tandis que dans le bâtiment avec la toiture non végétalisée ses fluctuation pouvaient monter jusqu'à 7°C. Les résultat sont détaillés dans le tableau 2.2.

Type de toiture	Type de surface/couche	Variation de la température [°C]
<i>Toiture Isolée</i>		
Toiture végétale	végétation vert foncée	26 – 29
	végétation rouge clairsemée	36 – 38
	substrat terre nue	~ 40
Toiture non végétale	peinture blanche	~ 40
<i>Toiture non isolée</i>		
Toiture végétale		28 – 40
Toiture non végétale		42 – 48

Tableau 2.2: Variation de la température température moyenne journalière de la surface extérieure des toitures végétales et non végétales, isolées et non isolées

L'analyse des résultats de la température de l'air intérieur du bâtiment isolé avec et sans végétation a révélé un comportement plus stable dans le bâtiment avec des toitures végétales malgré l'isolant. Sur la base de données, l'étude a identifié que 18% des températures dépassaient 30°C dans les bâtiments sans toiture végétale, tandis que pour les bâtiments avec toiture végétale cette valeur n'était dépassée que dans 5% des cas. De même, les écarts de température entre les deux types de bâtiments allaient jusqu'à 2°C [Niachou et al., 2001].

Un approche mathématique a été adoptée par [Niachou et al., 2001] afin d'évaluer la performance énergétique de la toiture végétale tout au long de l'année, avec la méthodologie suivante :

Tout d'abord l'estimation de la valeur du coefficient de transfert thermique pour différents types de toiture végétale avec et sans isolation a été réalisée. Pour cela 3 scénarios (I, II, III) ont été proposés avec 10 caractéristiques de toitures différentes résumées dans les tables 2.3 et 2.4. Ensuite, les besoins en énergie sont simulés pour chaque type dans les conditions climatiques d'Athènes. Cette simulation a été réalisée avec le logiciel TRNSYS, lequel permet de simuler les transferts de masse et de chaleur à l'intérieur des bâtiments.

Impact de l'isolation sur les effets thermiques de toitures végétales [Niachou et al., 2001] :

- Toitures non isolées : Les transferts de chaleur et les fluctuations dans les toitures non isolées sont beaucoup plus importantes dans les toitures

<i>Scénario</i>	<i>Description</i>
I	Sans ventilation nocturne
II	Ventilation nocturne en été de 4vol/heure
III	Ventilation nocturne en été de 10vol/heure

Tableau 2.3: Scénarios adoptés pour la simulation en TRNSYS

<i>Isolation</i>	<i>Dimension de la couche</i>	
	<i>Toiture</i>	<i>béton-isolant-béton (cm)</i>
Non Isolé	A1	10
	A2	15
	A3	20
	A4	25
Isolé Modérément	A5	5 – 5 – 5
	A6	10 – 5 – 10
	A7	15 – 5 – 15
Bien Isolé	A8	10 – 10 – 10
	A9	15 – 10 – 15
	A10	15 – 15 – 15

Tableau 2.4: Caractéristiques des toitures adoptées pour la simulation en TRNSYS

non végétales que dans les toitures végétales pour toutes les saisons de l'année. Pour une toiture non isolée, le coefficient de conductance thermique (U-value) varie de 7.76 (25cm de béton) à 18.18W.m⁻².K⁻¹ (10cm de béton) pour les toitures non végétales. Tandis que dans une toiture végétalisée ce coefficient varie de 6 à 16W.m⁻².K⁻¹.

- Toitures isolées modérément : Les pertes de chaleur sont plus limitées. Pour cet type de toiture, la différence du flux transmis entre une toiture végétale et non végétale est très petite. Le coefficient de conductance thermique varie pour cette type de toiture de 0.74 (15cm béton, 5cm isolant, 15cm béton) à 0.80W.m⁻².K⁻¹ (5cm béton, 5cm isolant, 5cm béton) pour les toitures non végétales. Tandis que dans une toiture végétalisée ce coefficient varie de 0.55 à 0.59W.m⁻².K⁻¹.
- Toitures bien isolées : (Haute performance de la toiture face aux échanges thermiques par conduction). Le flux de chaleur trouve à son passage une résistance plus élevée due à l'isolant et à son épaisseur. Le coefficient de conductance thermique varie pour cette type de toiture de 0.26 (15cm béton, 15cm isolant, 15cm béton) à 0.40W.m⁻².K⁻¹ (10cm béton, 10cm isolant, 10cm béton) pour les toitures non végétales. Tandis que dans une toiture végétalisée ce coefficient varie de 0.24 à 0.34W.m⁻².K⁻¹.

Les résultats des simulations des toitures végétales B et non végétales A sont donnés dans l'annexe A.2. A partir de ces résultats, un calcul des écono-

Isolation	Scenario	Economies d'énergie (%)						
		Chauffage	Climatisation			Total		
Toiture non végétalisée et toiture végétalisée		I-II-III	I	II	III	I	II	III
Non Isolée	A1-B1	45	45	54	61	45	52	56
	A2-B2	45	37	46	55	39	46	52
	A3-B3	45	28	39	46	34	41	46
	A4-B4	46	22	31	39	30	37	42
Isolée modérément	A5-B5	13	4	9	11	6	10	12
	A6-B6	13	2	5	6	4	7	8
	A7-B7	13	0	0	3	3	4	6
Bien Isolée	A8-B8	8	0	0	0	2	2	2
	A9-B9	8	0	0	0	2	2	2
	A10-B10	9	0	0	0	2	2	3

Tableau 2.5: Économies d'énergie pour chaque scénario

mies d'énergie a été réalisé ($A - B$) afin de montrer l'impact de la ventilation et de l'isolation sur les toitures végétalisées. La table 2.5 permet d'affirmer que lorsque la toiture est bien isolée, le rôle de la végétation devient négligeable. Les résultats des économies d'énergie sont illustrés dans la figure 2.2.

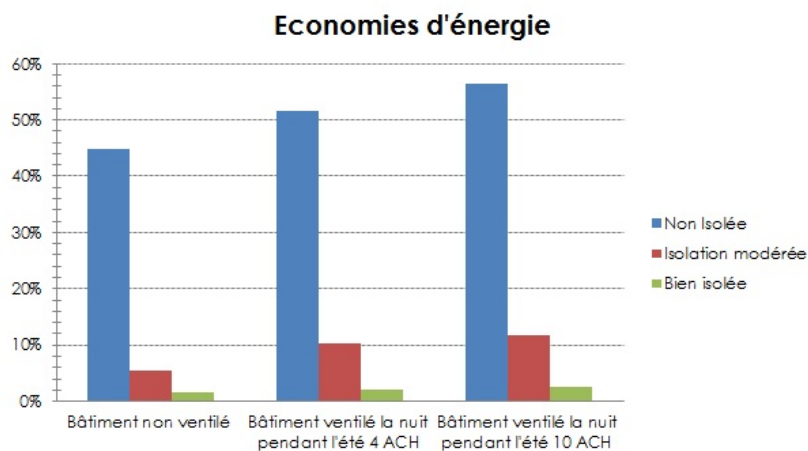


FIGURE 2.2: Total des économies d'énergie d'un toiture végétale

Cependant, [Niachou et al., 2001] ont montré que les bâtiments avec toiture végétale montrent pendant les jours typiques d'été une température de l'air intérieur plus basse pendant la journée, mais plus élevée pendant la nuit que les toitures non végétales (dans le cas des toitures non isolées ou isolées modérément). Cela peut s'expliquer par le fait que la chaleur est stockée dans le substrat pendant la journée et libérée pendant la nuit.

Par rapport au rôle de la ventilation on peut conclure que pendant la période d'été son effet est non négligeable et d'autant plus important que le

bâtiment est non isolé.

Une autre étude réalisée par [Palomo del Barrio, 1998] propose un modèle mathématique simplifié qui permet de représenter le comportement thermodynamique d'une toiture végétalisée. Pour cela, des hypothèses sont adoptées et des conditions aux limites à l'intérieur du bâtiment sont imposées. Les conditions extérieures sont le flux du rayonnement solaire, le flux provenant du ciel (rayonnement diffus CLO), la température et l'humidité de l'air et la direction et la vitesse du vent, prise des données météo à Athènes. La toiture est supposée suffisamment large pour qu'on puisse considérer une homogénéité thermique dans la direction horizontale. Dans ce cas, le flux de chaleur est unidirectionnel dans le sens vertical traversant le système végétal.

Le dispositif végétal étudié est composé de 3 sections : le support (le plancher), le substrat (ceci composé d'une matrice solide, une phase liquide et une phase gazeuse) et la canopée des plantes.

Dans les résultats obtenus, l'analyse de sensibilité a révélé les propriétés isolantes du dispositif. La végétation et la couche de substrat limitent le flux de chaleur à travers la toiture. Les paramètres ayant une forte influence sur les propriétés du dispositif ont été identifiés et détaillés :

- *LAI* : Ce paramètre exposé dans la section 1.2.2.4 représente la surface totale des feuilles par rapport à la surface de base. Ce paramètre (lié au coefficient κ_l) détermine les propriétés de transmission du rayonnement GLO de la végétation (voir Figure 1.3).
- *Épaisseur L, densité et humidité contenue dans le substrat* : ces trois paramètres ensemble déterminent la diffusivité dans le sol du flux énergétique (voir table 1.3). La diffusivité thermique augmente avec la densité et décroît avec la quantité d'eau contenue dans le substrat. La capacité isolante du substrat est donc d'autant plus importante avec sa teneur en eau. Des valeurs de flux de chaleur sont données en fonction de l'épaisseur du substrat dans la figure 2.3.
- *Type de feuilles* : Les plantes avec un développement large des feuilles et ayant une distribution horizontale limitent le transfert du rayonnement à la surface du substrat, générant ainsi un effet de masque plus optimal.

2.1.1.2 Toiture végétale Intensive

A la différence de la toiture extensive, la toiture intensive est constituée d'une couche de substrat plus épaisse afin de rendre possible le support de différentes strates végétales (herbacées, arbustives et arborées). Ce dispositif est aussi connu sous le nom de toiture ou terrasse jardin (voir Figure 2.1). Dans ce type de toiture, la terre de jardin peut être utilisée comme base au substrat, mais elle doit être combinée avec des éléments organiques, minéraux et chimiques

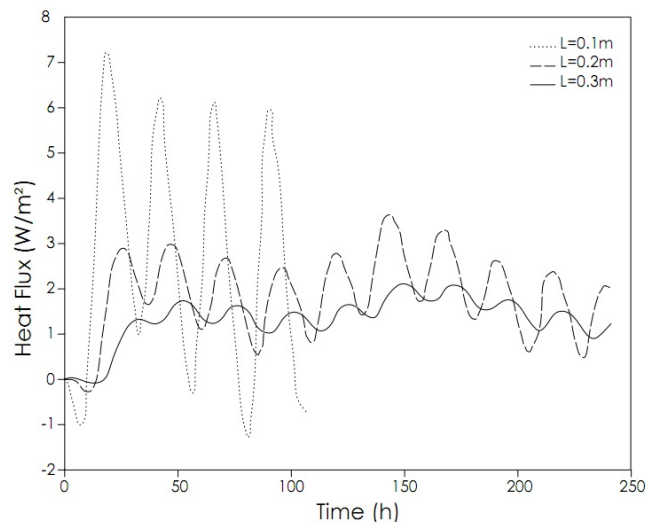


FIGURE 2.3: Effet de l'épaisseur de la couche de substrat L sur le flux de chaleur dans la toiture (LAI=5, humidité contenue dans le sol $w = 40\%$) [Palomo del Barrio, 1998]

afin d'améliorer les propriétés du sol et de favoriser la croissance naturelle des plantes. C'est pourquoi l'épaisseur requise dans les toitures végétalisées intensives doit être supérieure à $0.30m$.

[Jim and Tsang, 2010] ont réalisé en 2008 une campagne de mesure sur une toiture extensive (sky woodland) à Hong Kong installée sur un bâtiment de bureaux. La couche du substrat de cette toiture fait $1m$ d'épaisseur où sont plantées divers strates végétaux, avec de la végétation native chinoise. Les hauteurs moyennes de ce type de végétation varient de 3.5 à $6m$. Les objectifs de la recherche étaient :

- Constituer une base de données avec les mesures environnementales prises «In situ» afin d'établir les principales propriétés physiques du dispositif ;
- Construire à partir de ces données un modèle du bilan énergétique qui représente au mieux une toiture intensive ;
- évaluer la performance énergétique du «sky woodland» en mesurant le flux de chaleur qui traverse la toiture.

Dans les toitures extensives, les espèces arborées créent un microclimat dans la couche d'air formée entre la surface du substrat et la canopée végétale. De petits écarts de la température moyenne de l'air ont été trouvés à deux hauteurs différentes de cette couche : à 0.15 et à $1.60m$, avec des températures plus élevées proche de la surface. Ces écarts peuvent être expliqués par l'effet convectif lié à la vitesse du vent . Le vent fait croître les pertes de chaleur des

feuilles par convection à $1.60m$.

[Jim and Tsang, 2010] ont réalisé aussi des mesures de la température du substrat à la surface ($0m$), $-0.10m$, $-0.50m$ et à $-0.90m$ afin d'évaluer son effet sur les échanges thermiques par conduction entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Des fluctuations importantes de la température sont observées à la surface, cela est dû à l'exposition directe au rayonnement solaire. Dans le sous-sol, la température devient à peu près stable avec la profondeur. A partir des mesures effectuées, [Jim and Tsang, 2010] concluent qu'un effet d'isolation thermique optimal est obtenu avec une couche de substrat de $0.10m$. Les résultats ont montré des variations de la température moyenne à la surface pendant la période d'été entre $28^{\circ}C$ et $40^{\circ}C$, tandis que dans le sous-sol, la température reste stable ($\approx 30^{\circ}C$) à partir de $-0.10m$.

Cette épaisseur optimale de $10cm$ semble cependant insuffisante par rapport aux études réalisées par d'autres chercheurs. On pourrait citer ici les résultats obtenus par [Sanchez de la Flor and Alvarez Dominguez, 2004]. La figure 2.4 montre une stabilité de la température à $50cm$ pour les variations de température journalière et à $9.5m$ pour les variations de la température annuelle.

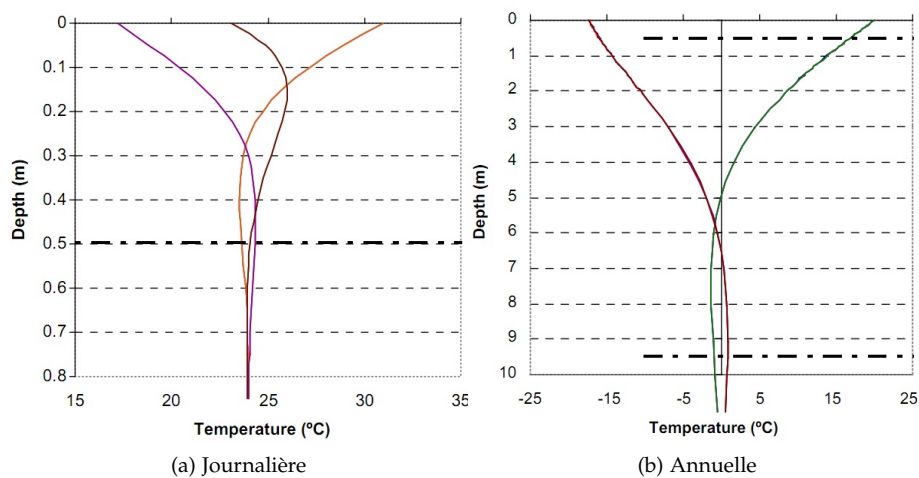


FIGURE 2.4: Variation de la température sous le sol en fonction de la profondeur [Sanchez de la Flor and Alvarez Dominguez, 2004]

A travers le calcul du transfert par conduction dans le substrat (loi de Fourier), [Jim and Tsang, 2010] a pu déterminer la performance d'isolation de cette couche. La performance thermique est affectée par la porosité et par la teneur en humidité du sol qui influence la valeur λ du substrat. L'eau fait augmenter la capacité calorifique du sol. Une quantité considérable d'énergie peut donc être stockée dans le substrat sans augmenter sa température. Le flux de chaleur est limité par la couche de substrat. Les variations de flux de chaleur

sont plus importantes dans le substrat que dans la dalle de béton en-dessous, ce qui met en évidence le pouvoir isolant de la couche de substrat.

2.1.2 *Façade Végétale*

Les recherches réalisées sur la performance énergétique de façades végétalisées sont moins nombreuses que celles sur les toitures végétales. [Anquetil, 2011] a trouvé que l'intérêt pour les façades végétalisées apparaît moins nettement par rapport aux toitures végétales. Cela peut s'expliquer par le fait que dans le plan de la performance énergétique, le choix des façades est peu mis en avant, malgré l'énorme variété des techniques et réponses architecturales développées jusqu'à présent. D'ailleurs l'adoption d'un dispositif végétal en façade comme alternative de protection implique une étude de la composition de ses éléments (fenêtres, balcons, terrasse, brise soleil, etc.) et du pourcentage de surface libre pour son installation. Au delà des certaines conditions, la façade végétale perd son intérêt comme élément de protection. Pour les toitures végétalisées ces conditions sont moins contraintes, vu que dans la plupart de cas la surface pour l'installation du dispositif est libre.

[Malys, 2009] a proposé un classement en trois familles en fonction du rôle thermique des éléments de végétation : (1) revêtement de façade, (2) brise-soleil et (3) élément de paroi. La différence entre les deux premières familles de façades végétalisées réside principalement dans la couche d'air formée entre la végétation et le mur. Dans le cas du brise soleil, la structure de support de la façade végétale est écartée des murs et fenêtres. Dans l'évaluation des performances énergétiques il faut donc tenir compte des échanges par convection qui ont lieu dans cette couche d'air. Pour la troisième famille (la végétation comme élément de paroi) une couche verticale de sol artificiel s'ajoute aux propriétés thermiques du dispositif. Dans le substrat des murs «murs vivants»¹, les effets d'isolation et de stockage thermique s'ajoutent à l'évaluation de la performance énergétique du dispositif.

Sur cette dernière famille de façades, on trouve actuellement des nombreuses variétés et techniques qui rendent difficile une caractérisation globale de la performance énergétique. Les recherches menées sur les façades végétales cherchent à évaluer plutôt leur rôle dans le microclimat que sur les consommations énergétiques des bâtiments. Dans ce sens, des effets positifs de ces dispositifs ont été trouvés par [Alexandri and Jones, 2008] sur les rues canyon. Ceux-ci ont proposé un modèle simplifié pour évaluer les transferts de chaleur et de masse dans une rue canyon constituée des façades végétalisées. Les résultats ont démontré que dans des climats humides, il est possible d'obtenir une baisse de température de l'air allant jusqu'à 8.4°C avec des façades végétalisées.

D'autre part, [Wong et al., 2010] a réalisé en 2010 une étude expérimentale sur 8 types différents des façades végétalisées, plus un mur de contrôle sans

1. living wall

végétation installées dans un parc à Singapour. Les dispositifs végétaux ont été placés sur des murs isolés où les deux faces sont exposées au rayonnement. Ces 8 murs «extérieurs» peuvent présenter donc des températures plus élevées que les températures des dispositifs installés dans des bâtiments. Des mesures de la température de l'air, de l'humidité relative *HR* (proche des dispositifs) et des températures à la surface du substrat et à la surface du mur (face au substrat) ont été prises lors de trois journées ensoleillées. Les résultats de ces mesures sont soumis à des incertitudes élevées, liées à l'entretien des plantes. La figure 2.5 montre le dispositif expérimental avec les systèmes végétaux.



FIGURE 2.5: Dispositif expérimental des murs végétalisées à Hortpark à Singapour. Extrait de : <http://comesingapore.com/gallery/photo/1621/living-walls-at-hortpark>

Le dispositif est composé de 8 systèmes végétaux verticaux *VGS*² : 7 types de murs vivants³, différenciés pour le type de végétation et pour les caractéristiques du substrat, et d'une façade verte⁴ composée de plantes grimpantes.

Singapour est une ville caractérisée par un climat chaud et humide avec des températures qui varient entre 23 – 30°C. L'objectif de l'étude est d'évaluer la performance des façades végétales pour le rafraîchissement. Des mesures additionnelles de la température de l'air, de l'humidité relative, du rayonnement solaire, de la vitesse et de la direction du vent et les précipitations ont été prises, afin d'observer les variations produites sous l'effet des murs.

Les résultats obtenus montrent que la température de surface du mur végétalisé et des façades vivantes est moins élevée que dans le mur de contrôle (sans végétation) dans toutes les configurations. La température à la surface

-
2. Vertical Greenery System
 3. Living wall
 4. Green façade

du substrat est plus élevée que la température à la surface du mur (sauf dans le cas du mur végétal avec les plantes grimpantes) de 06h00 à 18h00 du fait de l'exposition directe au rayonnement solaire. Dans le cas des façades vivantes les plus performantes ; l'écart des températures est cependant limité. Pendant les heures non ensoleillées, la température du substrat est moins élevée que celle à la surface du mur. Les variations des températures sont liées à la densité des feuilles et à la teneur en eau du substrat ; lorsque le substrat devient sec, la température croît. Le même effet est observé lorsque la densité des feuilles est réduite.

Dans la table 2.6 sont détaillés les résultats obtenus en terme de différence de température moyenne entre les dispositifs et le mur non végétalisé. Dans la figure 2.6 sont montrées les courbes de mesure des températures de surface des murs vivants les plus performants avec celle du mur végétalisé avec des plantes grimpantes (VGS2).

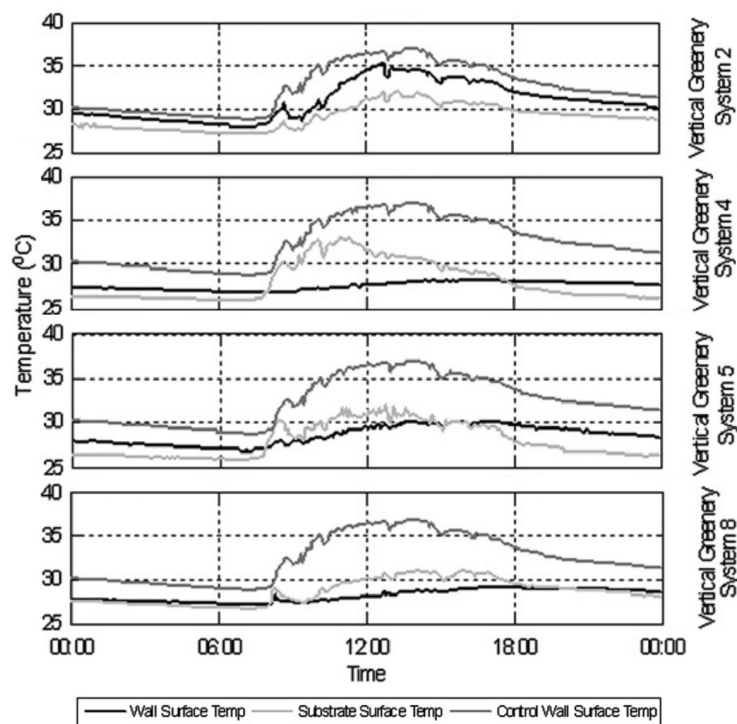


FIGURE 2.6: Température moyenne de surface du mur et du substrat façade végétale VGS2 et murs vivants VGS4, VGS5 et VGS8 [Wong et al., 2010]

La densité foliaire, la couleur des feuilles et l'état (santé) et type des plantes, ainsi comme l'état hydrique et le type de substrat, dotent le système de propriétés thermiques particulières. Lorsque le substrat devient sec, les températures des surfaces varient de manière plus importante et le système devient plus instable. Sous des conditions optimales, les fluctuations de la température de

VGS	Type de dispositif	Épaisseur substrat + plantes (m)	Écart de \bar{T} avec le mur contrôle (°C)	Conclusions
1	Mur vivant (Élément de façade)	0.35	10,03	Les différences de températures avec le mur contrôle, sont obtenues grâce à la densité des feuilles.
2	Façade végétalisée plantes grimpantes (Revêtement)	0.09	4,36	Il existe toujours une réduction de la température de surface, mais l'absence du substrat fait monter la température à la surface du mur.
3	Mur vivant (Élément de façade)	0.35	12	Ce mur présente la meilleure performance, une baisse significative à la surface du substrat est obtenue grâce à la densité des feuilles. L'épaisseur et les propriétés du substrat limitent le flux de chaleur et la température à la surface du mur est très basse.
4	Mur vivant (Élément de façade)	0.20	10,94	les fluctuations de la température sont minimales. Cette stabilité de la température est obtenue grâce aux propriétés du substrat (matière inorganique à base de mousse de tourbe) malgré la fine épaisseur.
5	Mur vivant (Brise soleil)	0.18	10,03	La lame d'air entre le mur et le système végétal permet d'obtenir des températures basses.
6	Mur vivant (Élément de façade)	0.12	6,11	La température à la surface du substrat présente de grandes fluctuations conséquences du type de plante et de la densité des feuilles. Ensuite l'épaisseur de la couche de substrat favorise le transfert thermique vers la surface du mur.
7	Mur vivant (Élément de façade)	0.18	6	Ce mur est des moins performants. La couche de substrat est seulement de 0.06 et la densité de feuilles était au moment de la prise des mesures la plus basse.
8	Mur vivant (Élément de façade)	0.48	10	Les différences de la température moyenne par rapport au mur contrôle sont dues en grande partie à l'épaisseur et au pouvoir isolant du substrat, mais aussi à la densité des feuilles.

Tableau 2.6: Conclusions des résultats obtenus en termes de différence de température de surface entre les systèmes végétaux et le mur non végétalisé

surface peuvent être réduit jusqu'à 50%.

Par ailleurs, [Wong et al., 2010] a trouvé des variations de la température de la couche d'air proche de la surface des systèmes végétaux verticaux avec des écarts qui vont jusqu'à 0.83°C à 0.60m du mur et 3.33°C à 0.15m du mur (VGS4) par rapport à un mur sans végétation. Grâce aux propriétés thermiques des plantes (d'albédo et d'émissivité) et aux phénomènes évapotranspiratives, la température à la surface reste plus basse et les échanges par convection sont donc limités. En réduisant la température de surface et la température de l'air extérieur, les besoins en énergie pour la climatisation sont aussi réduits [Akbari et al., 2001] et [Wong et al., 2010].

2.1.3 Arbres d'alignement

Comme il a été exposé dans la section 1.3 du premier chapitre, les *effets directs* des arbres sur les économies d'énergie sont liés à l'intersection du rayonnement solaire et à l'effet de barrière contre le vent. Les *effets indirects* des strates végétales générant un rafraîchissement de l'air sont liés à l'évapotranspiration.

Les campagnes de mesures et les simulations des effets des arbres, voire de la végétation en général, sur les économies d'énergie sont rares et non transposables du fait des conditions particulières dans lesquelles celles-ci sont réalisées. Cependant, on peut citer des exemples afin d'avoir un ordre de grandeur des effets.

[Akbari et al., 1992] ont réalisé des campagnes de mesure dans deux maisons à Sacramento en Californie : l'ombre et le microclimat générés par les arbres ont permis des économies d'énergie pendant l'été allant jusqu'à 30% avec une moyenne de 3.6 et $4.8\text{kWh}/\text{jour}$ et des pics de demande réduits de $0.6 - 0.8\text{kW}$ (environs 27% dans une des maisons et de 42% dans l'autre).

[Sanchez de la Flor, 2002] affirme que des campagnes de mesures réalisées dans des maisons individuelles sur les économies d'énergie en climatisation grâce à l'effet direct de l'ombre générée par des arbres varie de 15% à 35%. Ces économies obtenues sont dues à des situations particulières d'emplacement des arbres. L'emplacement des arbres est donc un des paramètres essentiels pour l'optimisation des effets directs. Il faut chercher à protéger les surfaces les plus exposées pendant l'été pour les heures où l'ensoleillement est maximal, sans trop compromettre les gains d'énergie pendant la période d'hiver. Les arbres à feuilles caduques, génèrent un effet de masque pendant l'été qui est réduit pendant l'hiver.

D'autre part, dans les stratégies d'emplacement, l'espèce d'arbre et son effet sur le vent sont aussi importants. En hiver (ou dans des climats froids), afin de réduire la consommation en chauffage, il est important de limiter l'impact du vent sur les façades. Pour cet effet, il est préférable de placer des espèces conifères

face à la direction du vent, de manière à créer une barrière et à limiter ainsi les échanges par convection entre la surface et l'atmosphère. Des simulations des écoulements du vent réalisées dans des maisons typiques ont montré des économies d'énergie pour le chauffage entre 10 – 15%. Les mesures prises sur des maisons individuelles à Dakota du Sud aux États Unis ont montré des économies d'énergie de 25% à 40% [Akbari et al., 2001].

Les phénomènes par évapotranspiration peuvent être plus importants que les effets directs. Lorsque la quantité d'arbres augmente, l'effet indirect augmente en plus grande proportion par rapport à l'effet direct (la chaleur latente massique L_v est plus importante que la chaleur sensible et la capacité thermique C_v ⁵).

Les effets direct et indirect des arbres sur les économies d'énergie sont fortement liés à la hauteur du bâtiment. La figure 2.7 montre l'effet du rapport hauteur arbre, hauteur façade sur les économies d'énergie maximales qui peuvent être atteintes.

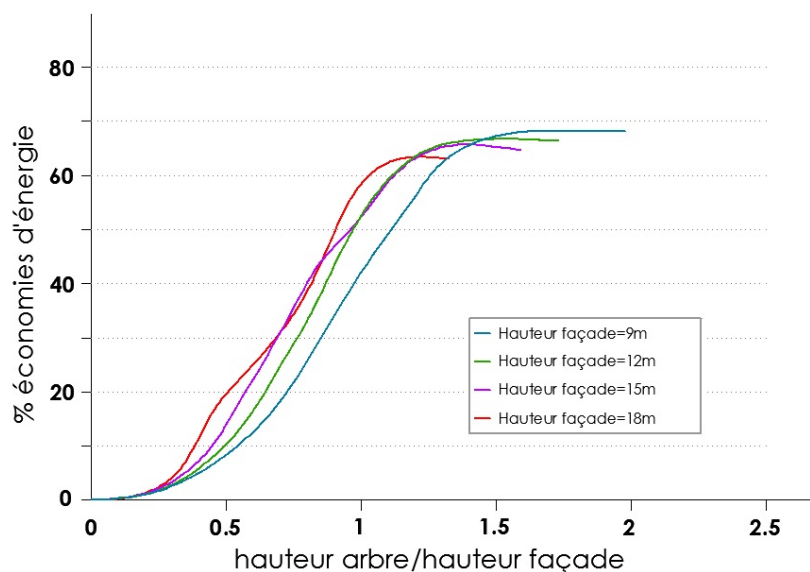


FIGURE 2.7: Economies d'énergie en fonction du rapport hauteur arbre / hauteur façade [Sanchez de la Flor, 2002]

Le comportement des arbres est conditionné par l'environnement immédiat. En ville les arbres sont plus exposés aux échanges radiatifs de grande longueur d'onde provenant des surfaces minéralisées. [Kjelgren and Montague, 1998] ont réalisé une campagne de mesure afin d'évaluer l'impact des surfaces proches des arbres. Dans un premier temps, l'impact du type de surface (Asphalté et gazonné) sous la canopée des arbres a été évalué. Les résultats obtenus des mesures ont montré que, même si, les écarts de température entre

5. A titre d'exemple, dans le cas de l'air à 20°C on a $L_v = 2500\text{kJ/kg}$ et $C_v = 1.96\text{kJ/kgK}$

les deux types de surface sont de 14°C , la température de l'air de la couche en dessous de la canopée varie seulement entre 0.5 et 1.0°C . Ceci est dû à la proximité entre les surfaces et au mélange d'air. La figure 2.8 montre les écarts de température entre une surface minérale et une surface végétalisée, ainsi que la température de l'air en-dessus de ces surfaces.

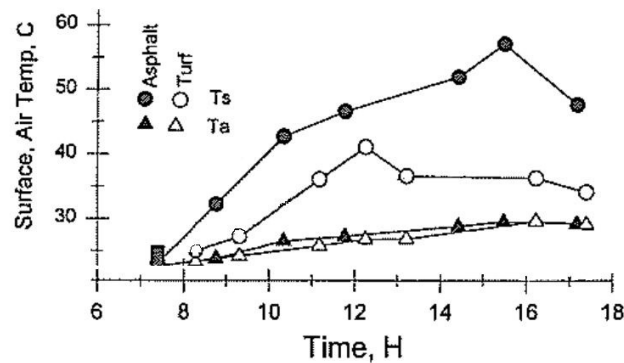


FIGURE 2.8: Températures de surfaces et température de l'air journalières : surface d'asphalte et surface en gazon

Cependant, lorsque l'arbre est exposé au rayonnement solaire direct, les surfaces minérales ont un effet sur la conductance des stomates. Au cours de la matinée et jusqu'à midi la valeur de la conductance est maximale avec des valeurs comprise entre 0.45 et 0.66 après quoi la conductance diminue et les stomates se ferment. Cette réaction s'explique par la sensibilité des stomates au VPD (l'air en dessus des surfaces minéralisée est plus sec que celui d'une surface végétalisée) et aux échanges de GLO. Par conséquent, une augmentation de la température des feuilles est produit. Il faut remarquer que le flux advectif n'est pas la cause, mais le flux par rayonnement GLO, vu que la température de l'air reste proche de celle des surfaces gazonnées. D'autre part, [Kjelgren and Montague, 1998] affirment que les masse d'arbres génèrent une protection qui permet de mitiger le flux radiatifs GLO des surfaces environnantes.

2.1.4 Masses végétales et parcs

Les masses végétalisées sont constituées de la combinaison des trois strates végétales (Table 2.1) qui donnent à la surface des propriétés thermiques qui limitent les effets de l'ICU dans la ville. Ils contribuent par ailleurs à réduire le ruissellement de surface des eaux pluviaux conséquence des surfaces imperméables et favorisent ainsi les phénomènes d'évaporation. Lorsque l'on réduit les surface évaporatives, la température de l'air devient plus important. Cela du fait qu'au cours du processus naturel d'évaporation de l'eau, l'air environnant cède une partie de sa chaleur pour que le phénomène ai lieu,

refroidissant ainsi l'air.

Un analyse paramétrique *CDF* (Computational fluid dynamics) a été réalisée par [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003] afin d'évaluer l'impact d'une surface végétale dans une zone urbaine de Athènes. Les conditions thermiques et d'écoulement du vent on été analysées en faisant varier 6 paramètres.

- La densité urbaine,
- le facteur de vue du ciel,
- la taille de la zone végétale,
- l'orientation,
- distance entre les bâtiments et la zone végétale,
- espèce de végétation.

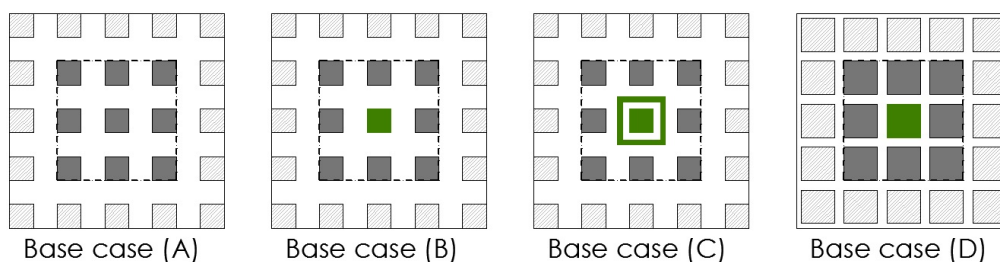


FIGURE 2.9: Configurations urbaines pour la simulation des effets des zones arborées [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]

La figure 2.9 illustre les différentes configurations adoptées pour la simulation des effets de la végétation au cœur d'un fragment urbain (composé des bâtiments de 15m de haut). Chacun des cas combinait à la fois des variations dans sa configuration, cela avec l'objectif de déterminer la sensibilité des paramètres d'aménagement et végétaux. Ces variations sont résumées dans l'annexe A.1. La température initiale utilisée pour les simulations était de 25°C. Pour les cas base A, B et C le rapport d'aspect des rues canyon est de 1.5. la direction du vent est de 0° (sud) avec une vitesse de 1m.s⁻¹.

La figura 2.10 montre le profil des températures, obtenu pour chaque configuration par rapport à la distance (la température a été prise sur l'axe du parc et perpendiculaire à la direction du vent sud).

Les résultats obtenus dans la simulation ont démontré l'influence de la végétation sur le microclimat. Les zones végétales ont un effet positif sur sa propre surface, ses limites, mais aussi sur son environnement, particulièrement

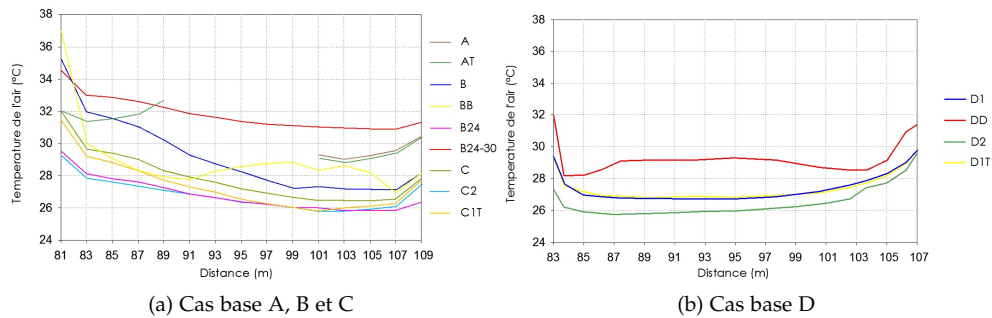


FIGURE 2.10: Profil de températures obtenu pour les différentes configurations urbaines [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]

sur les zones qui se trouvent sous le vent du parc. Cet effet est cependant décroissant par rapport à la distance entre les bâtiments et la zone végétalisée. Par ailleurs en augmentant la taille et la densité de la zone végétale, la température moyenne de l'air aux environs est réduite.

[Dimoudi and Nikolopoulou, 2003] affirme qu'une diminution de 1K de la température de l'air peut être obtenue pour chaque $100m^2$ de parc additionnel. Le cas C de la figure 2.10a en contraste avec le cas A met en évidence cet effet.

Lorsque l'on remplace le bâtiment du centre par de la végétation (du cas A au B), on obtient des baisses de température qui vont de $1^\circ C$ jusqu'à $6^\circ C$ du côté des routes environnantes qui se trouvent sous le vent derrière le parc. Cela est principalement dû au fait que la source de chaleur (le bâtiment dans ce cas) est remplacée par un dissipateur thermique (des strates végétales). En incrémentant la surface de la zone verte de 3 fois la surface originale, la température est réduite de 1.5 à $3.0^\circ C$.

Sensibilité des paramètres d'aménagement et de la densité de végétation
[Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]

- Rôle de la densité : La densification urbaine favorise les multiréflexions *GLO* entre les surfaces, cette effet fait croître la température moyenne de l'air dans l'ensemble des zones du fragment concerné. Dans les configurations urbaines le plus denses les températures sont plus élevés dans les rues les plus éloignées du parc. Cependant, pour les zones autour du parc cette augmentation est plus faible. Lorsque le rapport d'aspect (H/W) dans le rue canyon augmente, le mélange de l'air est limité et l'effet de la végétation reste relativement local. Ce qui fait croître la température dans les ruer les plus éloignées du parc.
- Effets de l'orientation : Lorsque l'orientation du vent est de 45° par rapport aux rues, les températures restent plus élevées, vu que le vent trouve à son passage plus d'obstacles et l'air n'arrive pas à bien se mélanger. On

peut obtenir des écarts de température qui vont jusqu'à 5°C pour une même configuration (cas *BB* et *DD*).

- Effet du type d'arbre : L'impact des arbres avec un taux d'évapotranspiration plus élevé semble ne pas être significatif. Les écarts ne représentent que 0.5°C pour les mêmes configurations. Mais il faut être prudent avec ce résultat car le modèle utilise l'expression d'évapotranspiration sous des conditions standard ET_O et non pas ETR .
- Effet de la vitesse du vent : Lorsque la vitesse du vent augmente de $0.1m.s^{-1}$ à $1m.s^{-1}$, l'effet de la végétation sur la température de l'air décroît, c'est-à-dire que la température de l'air est la même que celle à laquelle le vent a été introduit.
- Effet de la distance bâtiment-zone végétal : L'effet de la végétation est plus important dans les bâtiments que se trouvent sous le vent. La température de l'air décroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne de cette zone.

On observe dans la figure 2.11 le rôle de la végétation sur le microclimat urbain. La densification des zones végétales permet de réduire considérablement l'écart de températures, apportant à la mitigation de l'ICU. [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003] affirme qu'en règle générale une réduction de 0.8K pour chaque 10% d'augmentation du rapport zone végétal/zone construit.

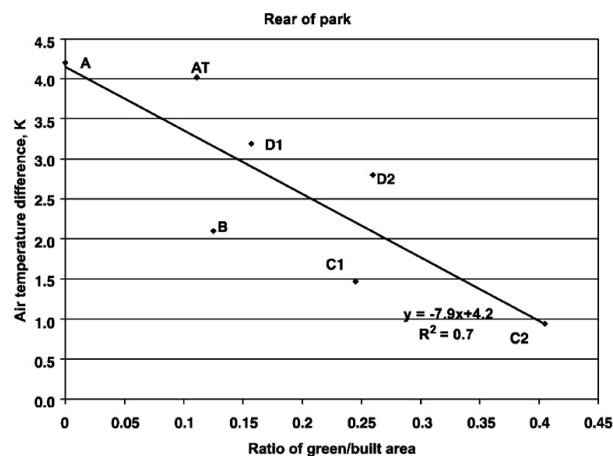


FIGURE 2.11: Réduction de la température T dans les zones sous le vent derrière le parc en relation au rapport zone végétal et zone construite [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]

Une étude réalisée par [Whitford et al., 2001] sur la température moyenne de surface de quatre sites à Merseyside au Royaume-Uni, met en évidence l'impact des masses végétales à l'échelle du quartier. Le modèle adopté par

l'auteur est celui du professeur TSO Chih Ping, lequel permet d'exprimer le bilan énergétique surfacique en terme de sa température de surface à travers une linéarisation des équations non linéaires. Cela permet de simplifier l'équation du bilan énergétique 2.1.

$$R = H + LE + G + J \quad (2.1)$$

Avec :

R : Flux de rayonnement net de la surface de la terre,

H : flux de chaleur sensible dû aux transferts convectifs,

LE : flux de chaleur latente,

G : flux par conduction dans le sol,

J : flux de chaleur stocké dans les matériaux.

Le tableau 2.7 résume le pourcentage des surfaces végétales et construit pour chaque site.

	<i>Sherdley Parc</i>	<i>Claughton</i>	<i>Wavertree</i>	<i>Scotland Road</i>
Environnement construit	44.0%	49.0%	78.4%	65.8%
Zone Végétale	52.4%	43.3%	12.2%	33.1%
Couverture des arbres	10.7%	15.8%	0.9%	0.3%
Sol nu	3.5%	6.6%	8.2%	11.1%

Tableau 2.7: Pourcentage de la couverture de type de surface pour quatre sites à Merseysude UK [Whitford et al., 2001]

Des différences de température de 7°C en été ont été trouvées entre des surfaces ayant 50% contre 15% de surface végétale. Les résultats de la simulation sont donnés dans la figure 2.12.

Sous les conditions aux limites de température, vitesse du vent et humidité relative constante, chacun des termes de l'équation 2.1 varie suivant les comportements ci-après :

- H et LE croît avec la température de surface,

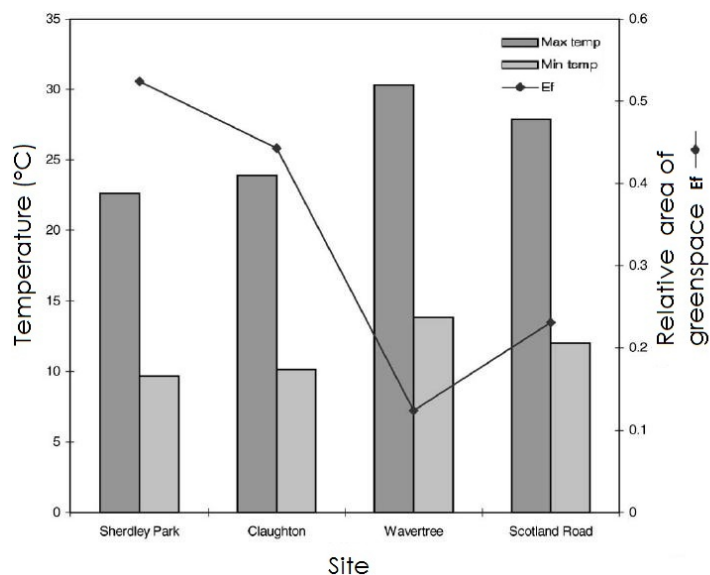


FIGURE 2.12: Variation de la température de surface avec le pourcentage de surfaces végétalisées dans quatre sites à UK [Whitford et al., 2001]

- LE croît avec la quantité de la surface de zone végétale : le flux de chaleur latente est lié à l'évapotranspiration et à la valeur de l'humidité relative. Les surfaces imperméables limitent les phénomènes d'évaporation,
- G croît avec la température,
- J croît avec la surface bâtie. A la différence de la zone végétale, la zone bâtie et le sol non couvert ont une capacité thermique plus élevée pour stocker de la chaleur.

2.1.5 Conclusions

Le tableau 2.1 montre les effets directs et/ou indirects générés par les strates végétales, les toitures végétalisées et les façades végétalisées sur le microclimat urbain et la performance énergétique des bâtiments. Ces effets sont obtenus à travers divers processus, parmi lesquels on peut citer :

- La réduction des gains de chaleur à travers l'ombre sur les fenêtres, murs et toitures. De cette manière, les parois ombragées ont des températures plus faibles et émettent moins en GLO
- En été, les arbres proches des bâtiments produisent un effet négatif sur les façades en limitant pendant la nuit les échanges GLO avec le ciel.

- L'écart de température entre l'air et la surface est réduit, limitant ainsi les échanges par convection.
- La végétation augmente le froid latent par addition d'humidité dans l'air produit de l'évapotranspiration. La température de l'air à proximité de la végétation est donc réduite.

Les performances énergétiques et climatiques des dispositifs végétaux sont liées à de caractéristiques et de paramètres qui ont une influence plus ou moins grande sur leur comportement. Dans le chapitre 1 les paramètres propres à la végétation ont été exposés. Dans ce chapitre chaque dispositif est exposé et le lien avec ses paramètres influents est établi. Dans la table 2.8 est présenté un résumé de l'information obtenue dans la recherche.

2.2 CRITÈRES D'APPLICATION DES DISPOSITIFS VÉGÉTAUX

L'intégration des systèmes de végétation en ville est une alternative pour l'amélioration des conditions du microclimat urbain, mais aussi des performances énergétiques des bâtiments. Cette intégration peut être faite dans les zones urbaines constituées à travers des projets de *réhabilitation urbaine*⁶ et de *renovation urbaine*⁷, exposés dans la section 3.2.2 du chapitre 3.

L'importance des effets directs et indirects que vont avoir les dispositifs végétaux est liée aux conditions climatiques du lieu, aux caractéristiques de l'aménagement urbain et du bâtiment, mais aussi aux caractéristiques propres du dispositif. Afin de tenir compte de ces conditions, une grille d'analyse est proposée. Le classement de cette grille est fait par familles de critères, définies à leurs tours par des indicateurs⁸. Ce classement a été réalisé comme une synthèse des résultats des recherches réalisées sur les dispositifs végétaux et exposés précédemment. L'intérêt de décrire les familles de critères par des indicateurs, réside dans la possibilité de les traiter et de les représenter dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG).

Les familles de critères proposées ici, sont un outil d'aide à la décision pour la construction des scénarios afin de rechercher une amélioration de la performance énergétique des bâtiments à travers l'intégration des dispositifs végétaux dans un aménagement urbain.

6. La rénovation urbaine fait référence à l'opération de complète remodelage d'un immeuble ou d'un quartier, passant par une démolition complète ou quasi-complète à laquelle succède une reconstruction. [De Gaspérin, 2006]

7. Le terme de réhabilitation urbaine fait référence au rétablissement d'un bâtiment ou d'un ensemble d'immeubles dans ses capacités à abriter des activités et des habitants [De Gaspérin, 2006]

8. Un indicateur est défini comme «une variable représentative des caractéristiques objectives ou subjectives d'un élément, d'un événement ou d'une toute autre manifestation. il est généralement utilisé pour donner une évaluation d'une situation ou d'un processus complexe» [Ait-Ameur, 2002]

DESCRIPTION/ Paramètres	Toiture Végétalisée (HS)		Façade végétalisée (HS)			Masse Végétale		arbres d'alignement (PT)
	Toiture Extensive	Toiture intensive	Comme revêtement	Comme brise-soleil	comme élément de paroi	Parc (PT)	Jardins (PT)	
Dispositif végétal								
Caractéristiques morphologiques du système / Biologiques de la végétation	Dimension Caractéristique		[Jim and Tsang., 2010]	[Malys, 2009] [Wong et al., 2010]	[Malys, 2009]	[Malys, 2009] [Wong et al., 2010]	[Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]	[Sanchez de la flor, 2002]
	Proportion (végétation: surface minéral)*	[Niachou et al., 2001]					[Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]	[Akbari et al., 1992] [Akbari et al., 2001]
	Type de végétation			[Malys, 2009] [Wong et al., 2010]	[Malys, 2009] [Wong et al., 2010]	[Malys, 2009] [Wong et al., 2010]		
	Persistance Caduque → Feuillus / type de feuille Persistante → Résineux			[Wong et al., 2010]	[Wong et al., 2010]	[Wong et al., 2010]		
	Patron morphologique (pattern)							
	LAI (leaf area Index)	[Palomo del barrio, 1998]						
	Distribution angulaire de feuilles							
	Densité de plantation							
	Diversité							
	Distance à la paroi du bâtiment							
Taux d'évapotranspiration (transpiration)								
Caractéristiques physiques	Propriétés thermiques	Albédo / Réflectivité Emissivité	[Niachou et al., 2001]					
Typologie	Végétal Urbain Collective							
	Végétal Urbain Privé							
Evaluation du dispositif								
Type de données	Expérimental / Campagne de mesure		[Jim and Tsang., 2010]					
	Modélisation / simulation	[Palomo del barrio, 1998]	[Jim and Tsang., 2010]					
Saison	Hiver							
	Été	[Niachou et al., 2001]	[Jim and Tsang., 2010]	[Wong et al., 2010]		[Wong et al., 2010]		
Type de résultats	Economies d'énergie	[Niachou et al., 2001]						[Akbari et al., 1992]
	Réduction du pic de consommation	[Niachou et al., 2001]						
Unités des résultats	%							[Akbari et al., 1992] [Sanchez de la flor, 2002]
	GJ. an ⁻¹ ou kWh.m ⁻²							
	*T↓ (surface et air)			[Wong et al., 2010]	[Wong et al., 2010]	[Wong et al., 2010] [Alexandri and Jones, 2008]	[Dimoudi and Nikolopoulou, 2003]	[Kjelgren and Montague, 1998]
	°							
Mode de gestion du dispositif								

	Information abondantes
	Information disponible
	Peu d'information
	Information non trouvée

HS: Hors sol
PT: Pleine Terre

Tableau 2.8: Paramètres influents sur le comportement énergétique et climatique des dispositifs végétaux

Lorsque l'on cherche à appliquer des critères pour la proposition d'un scénario de végétation permettant des économies d'énergie dans le bâtiment, le problème se pose dans la manière dont les indicateurs caractérisant ces

critères sont construits. Le rôle des indicateurs est de renseigner ou d'informer, mais aussi de mesurer les effets des interventions ou des actions adoptées. Par ailleurs, dans ce travail, l'intérêt d'utiliser des indicateurs est de permettre une intégration des dispositifs de végétation dans un projet d'aménagement, sans forcément imposer une seule solution. Selon [Benzerzour, 2004], l'objectif pour lequel un indicateur est utilisé n'est pas déterministe, il est donc un outil pour prendre de décisions restant ouverts à plusieurs mise en forme possibles .

[Ait-Ameur, 2002] décrit le processus pour la mise en œuvre d'un système d'indicateurs en quatre étapes :

- Définition du *contexte* : La première phase pour la construction d'un système d'indicateurs est la caractérisation du problème à traiter (où se situe le problème ?). Dans cette étape, le domaine et les critères d'application sont définis. Le *contexte* dans lequel se développe ce travail de master est la mise en place des dispositifs végétaux comme alternative pour la réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments. Les critères sélectionnés pour cet effet sont exposés ci-après.
- Délimitation de l'*échelle d'intervention* : Elle représente le terrain d'intervention pour la mise en application des indicateurs. L'*échelle d'intervention* dans laquelle on propose les indicateurs, est une échelle locale dans un fragment urbain du quartier de Pin Sec.
- Mise au point des *moyens expérimentaux* : Celle-ci représente les outils qui permettent de mesurer les effets de mise en œuvre des indicateurs. Dans un nombre d'indicateurs, les *moyens expérimentaux* ne sont pas abordés. Certains indicateurs ont été calculés directement sur les données SIG.
- Recherche de la *pertinence du système* : Dans cette dernière étape, l'évaluation du système d'indicateurs est effectuée. Ici les indicateurs adoptés sont mis en question, afin de tester leur pertinence. Les indicateurs proposés dans ce travail, permettent de mesurer les effets des paramètres mis en jeu pour la performance énergétique des bâtiments, il est possible que certains indicateurs permettant de mesurer cet effet n'aient pas été pris en considération.

Dans les cadre de ce travail, le choix des indicateurs est divisé en deux familles de critères : critères morphologiques et d'usage, et critères de performance dans lesquels sont pris en compte un nombre d'aspects qui interviennent dans la réduction de la consommation énergétique de bâtiments. Ces critères sont issus de l'analyse et la synthèse bibliographique détaillées dans les deux premiers chapitres de ce rapport. Les indicateurs que définissent les

critères, sont des indicateurs objectifs⁹. Des indicateurs subjectifs¹⁰ ont été listés mais n'ont pas fait l'objet d'une analyse. Cette dernière famille de critères est pourtant importante à l'heure de concevoir un projet urbain ou architectural. L'ensemble d'indicateurs caractérisant les familles des critères, sont donc des indicateurs objectifs qui peuvent être traduits dans un langage approprié pour leur utilisation dans un SIG.

La première famille, formée par des critères de performance, est donnée dans le tableau 2.9. Cette famille de critères fait référence à des paramètres qui vont permettre une augmentation de la performance énergétique du bâtiment à travers le dispositif.

Critères de performance									
CRITERE	INDICATEUR/INDICE	Toiture Végétale		Façade végétale			Arbres d'alignement	Masse végétal	
		Toiture Végétale Intensive	Toiture végétale extensive	Revêtement	Brise-soleil	Elément de façade		Parc	Jardins
Surface concernée	Capacité thermique								
	Albédo								
	Résistance/conductivité thermique								
	Transmissivité du vitrage								
	Flux Rayonnement GLO								
Site	Duré d'ensoleillement								
	Flux Rayonnement CLO direct et diffus								
	Vitesse du vent								
	Direction du vent								
Effet sur la consommation énergétique du bâtiment									
Pas d'effet/pas d'information									
+									

Tableau 2.9: Critère d'application en fonction de la performance

La deuxième famille est détaillée dans le tableau 2.10, celle-ci est constituée de critères morphologiques et d'usage, elle est liée aux caractéristiques du bâtiment et ses éléments, mais aussi à la forme urbaine.

La dernière famille listée dans le tableau 2.11 est constituée des critères qui ne peuvent pas être classés dans les familles précédentes, vu qu'ils n'ont pas d'effet sur la consommation énergétique des bâtiments. Cette famille représente principalement des critères subjectifs. On peut remarquer que certains de ces critères n'ont pas d'indicateurs pour les caractériser.

9. La définition d'indicateur objectif s'appuie sur celle donnée par [Ait-Ameur, 2002] : «Variables représentatives de données physiques mesurables directement sur le terrain. Ils décrivent des situations qui peuvent être mesurées et représentées quantitativement».

10. La définition d'indicateur subjectif s'appuie également sur celle donnée par [Ait-Ameur, 2002] : «Variable caractéristique de la perception que les individus ont d'une situation, ou leur réaction face à celle-ci».

Critères morphologiques et d'usage									
CRITERE	INDICATEUR/INDICE	Toiture Végétale		Façade végétale			Arbres d'alignement	Masse végétale	
		Toiture Végétale Intensive	Toiture végétale extensive	Revêtement	Brise-soleil	Élément de façade		Parc	Jardins
Forme urbaine	Densité	COS							
		CES							
	Géométrie/implantation	Rapport d'aspect H/W							
Continuité Bâti									
		Alignement							
bâtiment	Forme	Orientation							
		Hauteur							
		Compacité							
Caractéristiques du bâtiment	Fonction/Usage	Logement							
		Tertiaire							
		Enseignement							
	Etat	Ancien							
		Réhabilité							
		Neuf							
		BBC							
Caractéristique Enveloppe/Paroi		Surface							
		Dispositif de façade (Balcon, terrasse, etc)							
		Facteur du vu du ciel							
		facteur de forme							
		Taux de vitrage							
		Angle d'inclinaison							
Effet sur la consommation énergétique du bâtiment									
		Pas d'effet/pas d'information							
		+							

Tableau 2.10: Critère d'application en fonction de la morphologie

Critères Autres									
CRITERE	INDICATEUR/INDICE	Toiture Végétale		Façade végétale			Arbres d'alignement	Masse végétale	
		Toiture Végétale Intensive	Toiture végétale extensive	Revêtement	Brise-soleil	Élément de façade		Parc	Jardins
Qualité de cadre de vie	Densité végétal rapport de volume ou visibilité								
Ambiance									
Ecologiques/biodiversité									
Confort									
Effet sur la consommation énergétique du bâtiment									
		Pas d'effet/pas d'information							
		+							

Tableau 2.11: Autres critères d'application

2.3 CADRE SIG

Parmi les objectifs fixés dans le travail, figurait la mise en place de stratégies pour la construction des scénarios dans un *Système d'Information Géographique*. Le SIG est un outil qui permet d'analyser l'information géographique ainsi que de traiter des données alphanumériques spatialement référencées pour les représenter sur une carte ou plan.

Dans un SIG, chacune des données géographiques est associée à des données attributaires intégrées à une couche vecteur¹¹. Ces données tabulaires

¹¹. Le modèle vecteur est composé des objets ponctuels, linéaires et polygonaux regroupés sous forme de coordonnées x,y

sont des attributs avec de l'information de type qualitatif ou quantitatif qui renseigne sur chaque élément géographique [Esri France, 2011].

Les données géographiques et alphanumériques sont traitées dans un SIG comme OrbisGIS avec des requêtes à travers un langage SQL¹². Ces requêtes permettent de manipuler, de contrôler et de définir les données avec l'application d'une large variété de fonctions, parmi lesquels on peut citer : la construction de nouvelles cartes, la sélection et le tri de l'information, l'ordonnement des opérations, entre autres.

La construction et l'évaluation de scénarios sur une zone urbaine dans un SIG peuvent être alors développées à partir de la formulation de requêtes en répondant à la question «et quoi si?... on applique un ou un groupe de critères». Les critères sélectionnés seraient alors posés à la base des requêtes pour l'application des dispositifs végétaux et la construction de scénarios.

Dans ce domaine, une étude réalisée par [Hsie and Ward, 2006] sur un SIG a permis d'analyser l'effet de la morphologie urbaine sur le microclimat à Sheffield UK. L'objectif de la recherche était d'établir une corrélation entre le potentiel de la ventilation naturelle et la composition spatiale de l'environnement construit caractérisé par des indicateurs morphologiques.

L'analyse de l'influence de la forme urbaine sur les écoulements d'air a été faite à travers les indicateurs morphologiques suivants (ces indicateurs ont une influence directe sur le comportement du vent) :

- la rugosité du tissu urbain : permettant de calculer la hauteur moyenne de la canopée urbaine entre autres,
- la porosité : détermine la vitesse du vent,
- la sinuosité : qui tient compte de l'orientation des rues par rapport à la direction du vent. Cet indicateur est évalué avec un angle θ , si $\theta = 0$ (flux d'air parallèle à la rue) le potentiel de ventilation naturel est le plus élevé.

La méthodologie utilisée par [Hsie and Ward, 2006] consistait à appliquer une série des étapes d'analyses de données et de simulations du vent qui associe deux logiciels un de SIG et l'autre de CFD. Dans un premier temps l'acquisition des données climatologiques du site et de données géographiques est faite sur le logiciel ArcGIS. Cette base de données contenait, entre autre, de l'information sur les surfaces urbaines, l'orientation et les hauteurs des bâtiments ainsi que de l'information des objets considérés comme des obstacles et qui ont un effet sur le vent. Une deuxième étape consistait à faire l'analyse du site avec les indicateurs morphologiques déjà mentionnés. Ces indicateurs étaient mis comme des attributs dans une nouvelle couche. Ensuite avec une fonction du logiciel cette couche est subdivisée en zones ayant à peu près les mêmes caractéristiques morphologiques. Dans une troisième étape, les données

12. Structured Query Language ou langage de requêtes structurés en français.

SIG étaient intégrées dans une simulation CFD afin de faire les simulations des écoulement d'air dans chaque zone. La simulation a permis d'obtenir la distribution du flux d'air et les coefficients de pressions des façades des bâtiments. Finalement ces résultats sont à nouveau récupérés sur le SIG de façon à pouvoir les représenter sur une carte et les comparer aux indicateurs morphologiques pour sa validation.

Les résultats finaux sont illustrés sur des cartes climatiques divisées par des zones où la potentialité de ventilation naturelle est identifiée de la zone la plus performante à la moins performante.

Grâce à la plateforme SIG, il est possible d'analyser les caractéristiques morphologiques de chacun des éléments d'un aménagement urbain. De même que d'ajouter de l'information avec des indicateurs des performances énergétiques, qui vont avoir une influence sur le microclimat ou bien sur la consommation énergétique des bâtiments.

Dans le cadre de cette étude, les logiciels qui ont été utilisés pour le traitement des données géographiques et attributaires sont *OrbisGIS* et *ArcGIS*.

OrbisGIS est une plateforme qui permet de traiter et de créer des données géographiquement référencées (vectorielles et rasters). Ce logiciel développé par l'IRSTV¹³ est dédié aux simulations scientifiques. Dans le développement de ce mémoire, OrbisGIS a été utilisé principalement pour manipuler et compléter les données attributaires et le calcul des indicateurs principalement de densité.

L'autre logiciel utilisée, ArcGIS, est aussi un plateforme SIG développée par l'Esri¹⁴. Celui-ci permet de la même manière la création, mise en jour et traitement de l'information géographique. Cette plateforme offre une gamme de fonctions que facilitent l'analyses des données géométriques. ArcGIS a été utilisée pour dessiner et représenter les nouvelles couches, ainsi que pour réaliser les simulations de l'ensoleillement pour une journée en été et une journée en hiver.

Processus de construction de scénarios de végétation sur un SIG

La construction et l'évaluation de scénarios de végétation dans un SIG sont faites comme une succession d'étapes. La figure 2.13 illustre la procédure suivie.

La première phase est la récupération et la préparation des données géographiques de la zone d'intervention. Dans cette étape les attributs considérés pertinents doivent être ajoutés pour compléter l'information de chaque couche ou élément de la carte. Les données géographiques peuvent être acquises de

13. Institut de Recherche Sciences et Techniques de la Ville

14. Environment Systems Research Institute, Inc

la Base de Données topographiques BD TOPO¹⁵ de l'IGN¹⁶ ou de la Base de Données parcellaire BD PARCELLAIRE¹⁷ du cadastre. Dans le cadre de ce travail, les données géographiques du site d'étude, sont issus de la base de données topo de Nantes et l'information de la parcelle a été récupérée de de la BD-PARCELLAIRE du PCI¹⁸. L'actualisation de ces données a été faite à partir d'une image raster, une photo aérienne géoréférencée. Cette donnée raster était mise dans le même système de projection que les données vectorielles (Système de projection conique conforme Lambert).

La deuxième phase consiste à faire l'analyse des critères détaillés dans les tableaux 2.9, 2.10 et 2.11 pour la proposition des dispositifs qui peuvent être appliqués. Dans cette étape, des nouvelles couches issues de l'analyse sont créées. On pourrait citer à titre d'exemple l'orientation des bâtiments, leur compacité, la porosité, direction (en référence avec l'orientation) etc.

La troisième phase est la réalisation des simulations avec les conditions climatiques du site, afin d'évaluer la performance du scénario. Cette étape peut être développée soit avec des logiciels externes en leurs fournissant de l'information stockée dans le SIG ; ou bien avec des fonctions intégrées dans des logiciels de SIG tel que ArcGIS. Ce logiciel permet par exemple de réaliser des simulations de l'ensoleillement sur les surfaces au sol, de manière à visualiser les zones les plus exposées au rayonnement.

La dernière phase est la récupération des résultats sur le SIG (lorsque celles-ci sont réalisées dans des logiciels externes) pour créer les nouvelles couches et pouvoir les représenter et comparer aux couche créées dans l'étape d'analyses des critères.

15. La BD TOPO contient une description vectorielle 3D (structurée en objets) des éléments du territoire et de ses infrastructures, de précision métrique, exploitable à des échelles allant du 1 : 5000 à 1 : 50000. Elle permet de couvrir de manière cohérente l'ensemble des entités géographiques et administratives du territoire national. Cette BD contient, entre autre, de l'information du réseau routier, ferroviaire, de transport d'énergie et hydrographique, les bâtiments, la végétation, la structure administratif [IGN, 2009b]

16. Institut Géographique National

17. Le BD PARCELLAIRE Assemblage du plan cadastral dématérialisé, sur tout le territoire national couvert par le cadastre. Dans cette base de données on trouve de l'information de localisant parcellaire, division cadastrale, communes et arrondissement municipal [IGN, 2009a].

18. Plan cadastral informatisé

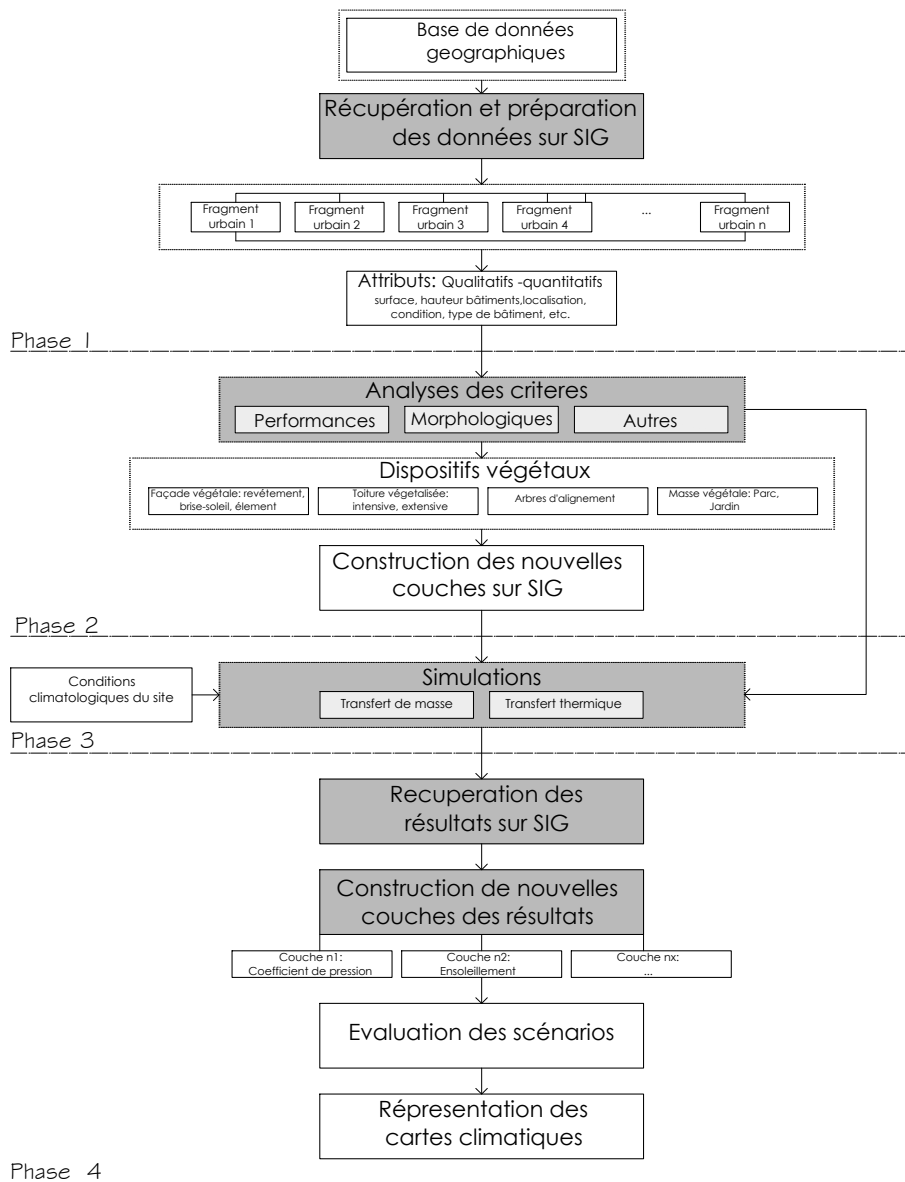


FIGURE 2.13: Schéma de processus de construction des scénarios

APPLICATION DES DISPOSITIFS POUR LA CONSTRUCTION D'UN SCÉNARIO DE VÉGÉTATION À PIN SEC

3.1 PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE : PIN SEC

Le site choisi pour la proposition d'un scénario de végétation est un fragment urbain constitué de grands ensembles dans le quartier Pin Sec (Doulong-Bottière) localisé au nord-est de Nantes. Cette zone a été construite à la fin des années 50, c'est-à-dire avant les réglementations thermiques (Figure 3.1).



FIGURE 3.1: Plan de localisation du site d'intervention à Nantes. Extrait de : <http://www.openstreetmap.org>

Description du site

La zone de Pin Sec est une zone résidentielle peu dense constituée de barres de logement (qui font entre 30 et 150m de long) implantées autour d'un cœur végétalisé. La majorité de ces constructions ont des hauteurs moyennes comprises entre 9m ($RDC + 2$) et 17m ($RDC + 4$). Il existe cependant, quelques exceptions de bâtiments $RDC + 1$ à caractère éducatif et un petit ensemble de maisons résidentielles localisées dans le même îlot.

1. Rez-de-chaussé

3.1.1 Plan masse actuel

Le plan masse actuel de la Figure 3.2 montre les valeurs de COS² (en rouge) et de CES³ (en noir) comme des indicateurs de densification. On remarque que les valeurs de CES sont comprises entre 0.15 et 0.23, ce qui correspond à des îlots caractérisés par de grands espaces ouverts. Une partie de ces espaces sont des zones vertes très arborées et une autre partie est destinée au parking.



FIGURE 3.2: Plan Masse Actuel Pinsec

2. Coefficient d'occupation de sol. Ce coefficient «détermine la densité de construction admise et le rapport exprimant le nombre de mètres carrés de plancher hors œuvre nette ou le nombre de mètres cubes susceptibles d'être construits par mètre carré de sol»[Ville de Nantes, 2007]

3. Coefficient d'emprise au sol. Ce coefficient « est le rapport entre la surface occupée par la projection verticale du volume hors œuvre de la construction et la surface du terrain d'assiette du projet» [Ville de Nantes, 2007]

3.1.2 *La végétation existante*

Comme il a été montré au long du travail, la végétation et les espaces végétalisés, contribuent de manière significative aux effets directs et indirects dans la réduction des charges de climatisation dans le bâtiment pendant la période d'été. Cependant ces effets peuvent compromettre les échanges radiatifs avec le ciel qui favorisent le refroidissement nocturne.

Lorsque l'on cherche une efficacité des effets produits par les zones végétalisés il faut tenir compte de leur densité, de leur forme, dimension et position.

A Pin Sec les espaces publics se caractérisent par une densité de couverture végétale très élevée. Des arbres de grande taille de diverses espèces sont plantés à l'intérieur des îlots. Les arbres de taille moyenne et petite sont utilisés principalement comme des arbres d'alignement et autour des parkings. Les arbres feuillus sont plus présents que les conifères, que l'on trouve généralement par petits groupes. Parmi les espèces des conifères le plus représentatifs du lieu se trouvent : le cèdre de l'atlas, l'épicéa, le pin sylvestre et le sapin. Parmi les espèces de feuillus, on trouve de jeunes érables, des chênes, des bouleaux, des platanes et des peupliers, et quelques espèces d'arbres fruitiers comme des cerisiers et des pommiers. Dans certains cas les peupliers et les bouleaux sont utilisés comme arbres d'alignement au pied des façades, dont l'objectif est de cacher le vis-à-vis des immeubles voisins. Des haies sont aussi utilisées comme des éléments séparatifs mais aussi comme de barrières visuelles.

Dans la récupération de données géographiques des arbres existants sur SIG, une partie de l'information a été facilité par SEVE⁴. L'autre partie a été relevée directement du site et actualisé sur le SIG. Dans la carte du plan masse actuel (Figure 3.2) les arbres feuillus sont représentés par des points verts clairs et les conifères par des étoiles vertes foncées. La hauteur estimée des arbres est enregistrée dans les données attributaires de chaque élément. Cette information est utilisée pour la proposition de densification et pour les stratégies d'application des nouveaux dispositifs végétaux.

3.1.3 *Conditions Climatiques : Vent et Ensoleillement*

Le vent

Le vent est un paramètre important qui doit être considéré lorsqu'on cherche une optimisation de l'espace urbain afin d'obtenir des meilleures performances du point de vue climatique et énergétique. Les variables climatiques liées au vent, utilisées en thermique du bâtiment sont : sa direction, sa vitesse et le coefficient de convection. Dans le milieu urbain, la vitesse du vent est réduite par la canopée urbaine. Dans les zones urbaines, la vitesse moyenne du vent peut être réduite de 50% par rapport à celle mesurée au niveau des surfaces

4. Service des Espaces Verts et de l'Environnement de la Ville de Nantes

d'eaux libres [Bouyer, 2009]. Les bâtiments sont des obstacles qui génèrent à son intersection des turbulences sur l'écoulement.

Le champ de pression représenté par les coefficients de pression⁵ sur les façades, est généré par l'action du vent. Ce coefficient est un indicateur qui rend compte du potentiel de ventilation naturelle dans les bâtiments. La ventilation naturelle, comme il a été montré dans le Tableau 2.5 du Chapitre 2, joue un rôle important lors de l'application des stratégies pour les économies d'énergie pendant la période d'été. D'autre part, les échanges convectifs sur les façades produits par les écoulements d'air, sont des conditions à limiter pendant la période d'hiver (afin d'éviter des pertes significatives de chaleur) et recherchées pendant la période d'été quand la température de l'air est inférieure à celle des parois. La convection participe alors dans la charge et la décharge d'énergie à travers les parois du bâtiment.

L'orientation du bâtiment, la configuration et la forme urbaine participent aux effets induits par les écoulements d'air sur le microclimat et sur la performance énergétique du bâtiment. Une configuration plus perméable au vent pendant la période d'été fait croître les effets positifs des zones végétalisées sur les zones bâties en favorisant le mélange d'air. Par exemple, [Bouyer, 2009] affirme que l'effet canyon en ne considérant que les effets liés au vent, dégrade considérablement les conditions de ventilation naturelle et implique dans toutes les configurations de construction une augmentation de la charge de climatisation.

La végétation agit face au vent comme un obstacle en réduisant sa vitesse. La hauteur, l'épaisseur et la porosité de l'obstacle, déterminent l'intensité et l'effet en aval du vent. Le LAI intervient comme un paramètre qui permet de calculer l'effet de la végétation sur la vitesse du vent.

A Nantes, les vents dominants proviennent principalement de l'ouest ; cela s'explique pour la proximité de la ville à l'océan et aux dépressions cycloniques de l'Atlantique. Pendant la période d'hiver, des flux de vent froid proviennent du nord-est (NE et ENE). Tandis que pendant la période estivale les vents provenant de l'océan sont plus doux. La direction du vent sud-ouest et nord (NNE) est plutôt rare.

La Figure 3.3 montre les directions du vent, sa vitesse et la température moyenne de l'air pour chaque mois de l'année. Les directions de vent ouest sont représentées avec des flèches vertes et les directions de vent est sont représentées en orange. La rose des vents est donnée dans la Figure 3.4.

5. Le coefficient de pression extérieure C_{pe} , est le coefficient qui rend compte de l'effet du vent sur les surfaces extérieures des bâtiments en fonction de l'aire de la paroi.

Direction et vitesse du vent à Nantes

Mois	Jan 01	Fév 02	Mar 03	Avr 04	Mai 05	Juin 06	Jui 07	Aoû 08	Sep 09	Oct 10	Nov 11	Dec 12
Direction du vent dominant												
Vitesse du vent (Knots)	9	9	10	8	8	7	8	8	9	9	8	8
Température de l'air moyenne (°C)	7	8	10	13	16	20	21	20	18	15	11	6

FIGURE 3.3: Température, direction et vitesse du vent à Nantes (statistiques basées sur des observations entre juillet 2001 et juillet 2011). Source : <http://fr.windfinder.com>

Ensoleillement

Le flux solaire est un potentiel énergétique évalué par la quantité d'énergie arrivant sur les surfaces. La valeur du rayonnement solaire va d'ailleurs déterminer en grande partie les échanges CLO entre les surfaces [Bouyer, 2009].

Le rayonnement ainsi que le vent sont influencés par la configuration et les propriétés thermiques des surfaces urbaines. En milieu urbain, la durée d'ensoleillement est réduite par les effets de masque portés par les bâtiments, mais aussi par la végétation. Dans le cas de Pin Sec, les grands espaces ouverts, résultat de la configuration spatiale des grands ensembles, donnent au site des caractéristiques particulières du fait des phénomènes thermiques qui s'y produisent. La manière dont les éléments sont disposés, va déterminer en grande partie les apports énergétiques et donc les conditions microclimatiques du site.

A Pin Sec, les zones au centre de l'îlot ne bénéficient pas suffisamment d'ensoleillement pendant la période d'hiver à cause de l'ombre portée par les bâtiments et la masse arborée qui s'y trouvent. Les grandes barres en direction est-ouest, génèrent de l'ombre sur les espaces publics et dans des cas très ponctuels sur les façades des bâtiments voisins. Cela est dû à une implantation dispersée des bâtiments.

La configuration en barre et l'orientation des bâtiments favorisant la direction est-ouest génèrent des façades très exposées au rayonnement solaire avec des surcharges thermiques non négligeables. Dans certains cas, les arbres d'alignement procurent une protection sur ces façades. Cette condition s'inverse pendant la période d'été où la puissance reçue par les surfaces des façades exposés (Sud, sud-est et sud-ouest) devient un flux de chaleur positif comme source d'énergie à utiliser.

Dans la Figure 3.4, on observe les zones d'ensoleillements en hiver et en été obtenus à partir des simulations. L'effet de la végétation n'a pas été prise en compte par les simulations. Cependant, il est important, de savoir que l'ombre portée par la végétation au sol et sur les façades, contribue en été

à une réduction de la température de surface en limitant le rayonnement solaire.

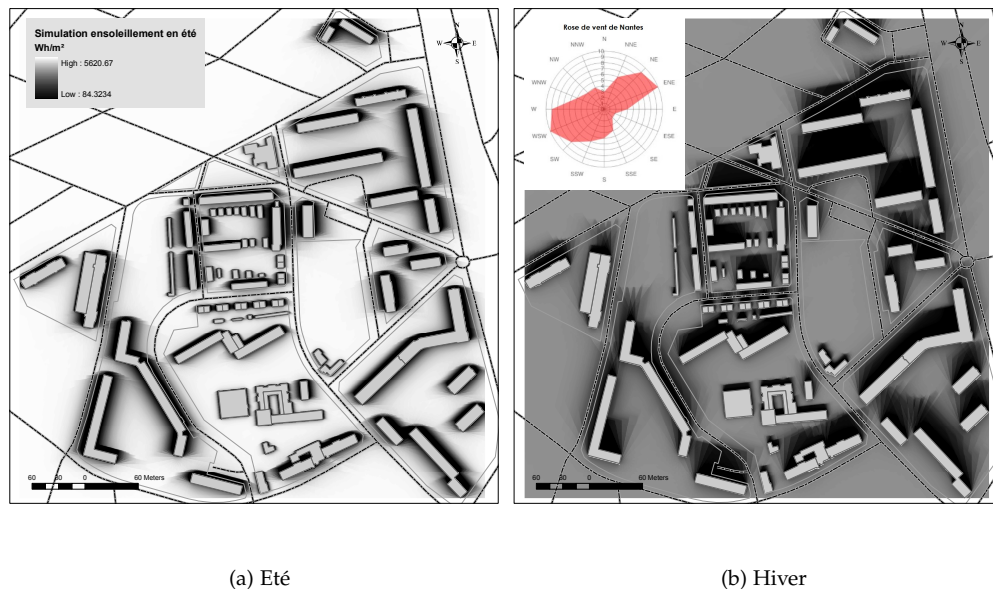


FIGURE 3.4: Simulation d'ensoleillement sur le site d'étude Pin Sec

3.1.4 Règlements du site de Pin Sec Zone UH

Le site est classé UH par le Plan local d'urbanisme *PLU* de Nantes (Plan de zonage du PLU 61 – 36).

Définition

La zone *UH*, est définie dans le PLU comme «les zones urbanisées sous forme d'espaces ouverts construits de tours et des barres» avec quelques secteurs pavillonnaires. [Ville de Nantes, 2007]

«Ces zones font dans la majorité l'objet d'opérations de revitalisation qui pourront entraîner des démolitions, des constructions nouvelles ou de changement d'affectation permettant une mixité des fonctions mal assurée jusqu'à présent». [Ville de Nantes, 2007]

Implantation de constructions

- L'implantation des constructions neuves est libre par rapport aux emprises publiques et aux voies, et en limite ou au-delà des espaces boisés classés.
- L'implantation des constructions projetées par rapport aux limites séparatives stipulées dans le PLU est résumée dans le Tableau 3.1.

Hauteur de la construction projetée (h) [m]	Retrait «hors tout» [m]	Retrait Minimum [m]
$h \geq 7$	$h/2$	6
$4 \leq h < 7$	0 Adossement 6 sinon	-
$4 > h$	0 ou 3	-

Tableau 3.1: Implantation des constructions par rapport aux limites séparatives PLU

- L'implantation d'une construction par rapport à une autre sur une même propriété est donnée dans le Tableau 3.2

Hauteur de la construction projetée (h) [m]	Retrait «hors tout» [m]	Retrait Minimum [m]
$h \geq 4$	0 ou $h/2$	6
$h < 4$	0 ou 3	-

Tableau 3.2: Implantation des constructions par rapport aux limites séparatives PLU

Le coefficient d'occupation de sols *COS* pour la zone *UH* n'est pas réglementé dans le *PLU*.

Hauteur maximale

La hauteur maximale permise dans le PLU pour cette zone est limitée à 17m «hors tout», ce qui correspond à des bâtiments *RDC + 4*.

Aspect extérieur des constructions

Pour les constructions nouvelles le PLU stipule que celles-ci doivent tenir compte des particularités et typologiques marquantes des constructions avoisinantes. Les façades pignons doivent avoir le même soin que les autres façades de construction [Ville de Nantes, 2007].

3.2 CONSTRUCTION D'UN SCÉNARIO D'APPLICATION DES DISPOSITIFS ET MISE EN PLACE DANS UN SIG

3.2.1 Formalisation des critères

La formalisation des critères à travers les indicateurs dans le cadre SIG est faite à travers des requêtes. L'objectif est de pouvoir traduire les indicateurs donnés dans les tableaux 2.9, 2.10 et 2.11 dans le langage SQL pour permettre l'application des dispositifs végétaux.

Dans la figure 2.13 le processus pour la construction de scénarios est exposé. Dans le cas de Pin Sec, la phase de récupération des données est exposée dans la section 2.3 (Processus de construction de scénarios de végétation sur un SIG). La préparation des données géographiques est faite en utilisant les deux logiciels : OrbisGIS et ArcGIS. L'actualisation des données est faite à partir d'une image aérienne sur OrbisGIS, ainsi que le complément des données attributaires. La représentation cartographique est développée sur ArcGIS.

Dans la deuxième phase (Figure 2.13), l'analyse de critères de performance, morphologiques et d'usage se fait alors nécessaire. Comme il a été déjà exposé, c'est à travers les critères et les indicateurs que les dispositifs végétaux sont mis en place. Dans la plateforme SIG ces indicateurs ont été analysés et incorporés sous forme d'attributs dans les couches existantes et sous forme de nouvelles couches.

A titre d'exemple, parmi les critères morphologiques un des indicateurs proposés est le coefficient d'emprise au sol CES comme un indicateur de densité. Le CES, défini comme le rapport entre la surface au sol de la construction et la surface de la parcelle sur laquelle elle se trouve, est calculé dans le SIG d'OrbisGIS suivant l'équation 3.1. Le résultat est une nouvelle couche avec l'information de CES pour chaque parcelle ou îlot dans le cas du grand ensemble de Pin Sec. Ce même processus peut être fait pour calculer le COS. Ces deux indicateurs renseignent sur la possibilité de mise en place d'un dispositif type parc ou arbre d'alignement.

$$CES = \frac{1}{A_s} \sum_{i=1}^n Ac_i \quad (3.1)$$

où :

Ac_i : Surface occupée par la construction i ,

A_s : Surface de la parcelle (dans le cas de grands ensembles : surface de l'îlot),

n : Nombre de bâtiments au sol.

Dans le cas de Pin Sec, il a fallu faire appel à une série des requêtes afin de construire cet indicateur, ainsi :

Intersection

```
create table my_newtable_intersection as select ST_INTERSECTION
(a.the_geom, b.the_geom) as the_geom, a.gid from my_table_ilot a, my_
table_bati b where ST_INTERSECTS (a.the_geom, b.the_geom);
```

Union

```
create table my_newtable_union as select ST_UNION (the_geom) as the_geom, gid from my_newtable_intersection group by gid ;
```

Calcul de surface

```
create table my_newtable_surface as select ST_AREA(the_geom)as surfacebati from my_newtable_union ;
```

CES

```
create table my_newtable_CES as select b.*, a.surfacebati/b.surfaceilot as CES from ilots b, my_newtable_surface a where a.gid=b.gid ;
```

Dans les SIG il est aussi possible de calculer d'autres indicateurs morphologiques tels que l'orientation des bâtiments et la compacité⁶. Par exemple, pour déterminer l'orientation dans le cas des formes complexes il faut passer par deux étapes⁷ : la première étape correspond à la détermination du rectangle minimum englobant sur OrbisGIS à travers la fonction *ST_MINIMUMRECTANGLE* ; la deuxième étape, faite sur ArcGIS à travers la fonction *Calculate Polygon Main Angle*, calcule la direction de la forme définie en OrbisGIS (rectangle minimum) par rapport à l'horizontal. C'est-à-dire que pour les valeurs d'angles proches de zéro 0°, les bâtiments privilégient l'orientation est-ouest et pour les angles proches de 90° l'orientation est nord-sud. On peut ainsi donner une plage de valeurs, en déduire l'orientation des bâtiments, et de cette manière identifier les bâtiments plus exposés au rayonnement solaire par rapport à leur orientation (Figure 3.5). La requête pourrait se construire de la manière suivante :

Rectangle minimum

```
create table my_newtable_recmin as select ST_MINIMUMRECTANGLE(the_geom)from My_Table ;
```

La deuxième phase est fait sur la plateforme d'Arc GIS, avec la nouvelle couche créé sur OrbisGIS.

Certains indicateurs caractérisant les critères morphologiques, tel que la hauteur, l'état du bâtiment et l'usage, doivent être fournis directement dans les attributs. Dans le cas des critères de performance, la plupart des indicateurs doivent être obtenus soit par des mesures sur site, soit par des simulations. ArcGIS permet, à travers la fonction *Area solar radiation*, de visualiser les zones ensoleillées au sol dans une date donnée. Il est cependant nécessaire d'utiliser

6. Compacité de la géométrie par rapport au cercle

7. Dans le cas de formes simples la première étape n'est pas nécessaire. C'est le cas de Pin Sec, où les bâtiments sont principalement de barres

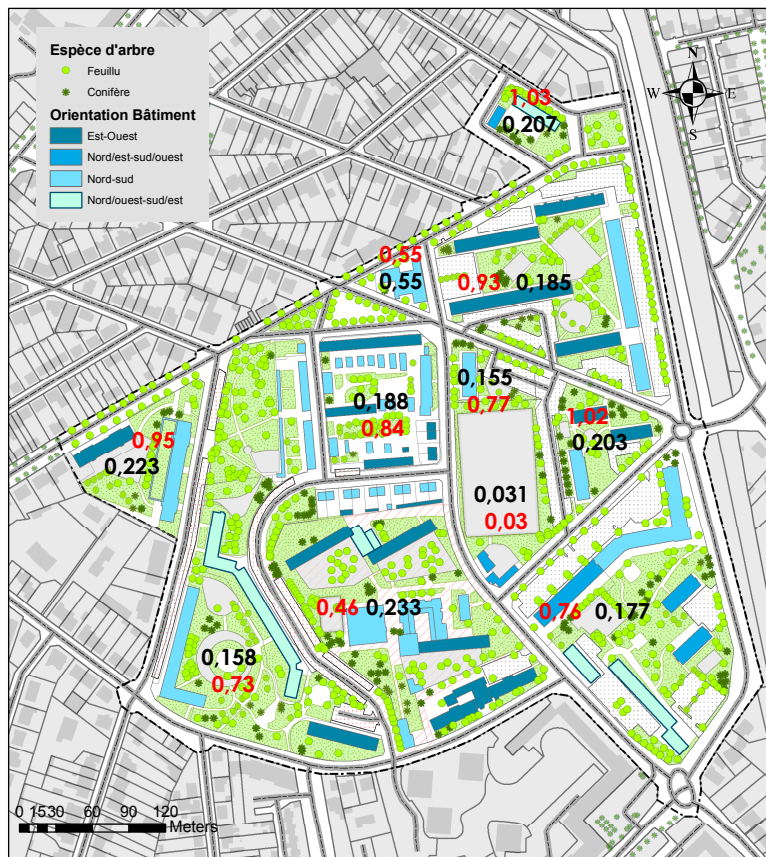


FIGURE 3.5: Calcul des indicateurs : orientation, COS et CES

des logiciels donnant une précision plus fiable sur les données de rayonnement arrivant sur toutes les surfaces. Ceci permettrait d'évaluer la pertinence d'utilisation d'un dispositif végétal donné.

Il faut préciser que dans le processus de construction du scénario, certains indicateurs n'ont pas pu être exploités soit à cause d'un manque d'information (comme par exemple les propriétés thermiques des matériaux des façades) soit par la non utilisation d'outils de simulation pour les obtenir (par exemple le comportement des écoulements des vents sur le site).

Après avoir calculé les indicateurs, l'étape suivante consiste à donner des valeurs seuils permettant faire une sélection et identification des zones potentielles pour la mise en place des dispositifs végétaux. Cette première sélection est accompagnée d'une interaction entre les indicateurs. Par exemple, pour un dispositif végétal donné, avec n indicateurs X_1, X_2, \dots, X_n , délimités par $\min_1 < X_1 < \max_1, \dots, \min_n < X_n < \max_n$, la construction de la requête en

SIG peut se faire de la façon suivante :

create table my_ newtable **as select** tous mes indicateurs **from** my_ table_ bati ou my_ table_ ilot **where** Indicateur X_1 = condition 1 (sélection de valeurs seuils) **and** ... **and** Indicateur X_n = condition n (sélection de valeurs seuils) ;

L'étape suivante est donc la représentation des dispositifs sur le SIG. Après avoir repéré les zones potentielles pour la proposition d'un dispositif de végétation donné, l'application sur l'outil SIG se fait un peu complexe, vue qu'il est nécessaire dans certains cas d'avoir une représentation en 3D avec les faces du bâtiment comme des identités.

De cette manière, pour un projet d'aménagement, une lecture des critères permettra d'évaluer la pertinence d'un dispositif pour réduire la consommation énergétique du bâtiment. Dans le cas de Pin Sec, après l'analyse de critères, certains indicateurs ont été déduit d'une lecture sur la carte. La représentation des dispositifs, fait de manière manuelle, est le résultat de la création de nouvelles couches.

Une proposition de densification est réalisée sur ArcGIS avant l'application des dispositif végétaux. Cette étape est exposée ci-après.

3.2.2 *Plan masse Proposition : densification*

Aujourd'hui les grands ensembles font l'objet de projets de rénovation et de réhabilitation urbaine. Dans ces quartiers, la plupart des bâtiments se trouvent en état de détérioration et les performances thermiques en-dessous des standards demandés par la réglementation.

D'autre part, en raison des enjeux climatiques, énergétiques et environnementaux, la densité urbaine se place comme une réponse à l'aménagement de la ville. Du point de vue énergétique, la densité urbaine pourrait être mis en rapport avec la consommation énergétique des bâtiments à travers des indicateurs morphologiques et de performance énergétique des bâtiments (comme il est exposé dans la section 2.2 du chapitre 2). A titre d'exemple, [Maïzia, 2008] propose la compacité comme indicateur morphologique. Cette indicateur représente le rapport entre le volume d'un bâtiment ou d'un ensemble urbain et la surface de son enveloppe. Par rapport à la consommation énergétique du bâtiment, plus la valeur de la compacité est petite, plus il y a de déperditions d'énergie en raison d'une plus grande surface d'échange. L'autre indicateur de performance énergétique, qui peut être incorporé au précédent, c'est le coefficient de déperditions thermiques U_{bat} du bâtiment. Ce coefficient caractérise la capacité d'isolation de l'enveloppe.

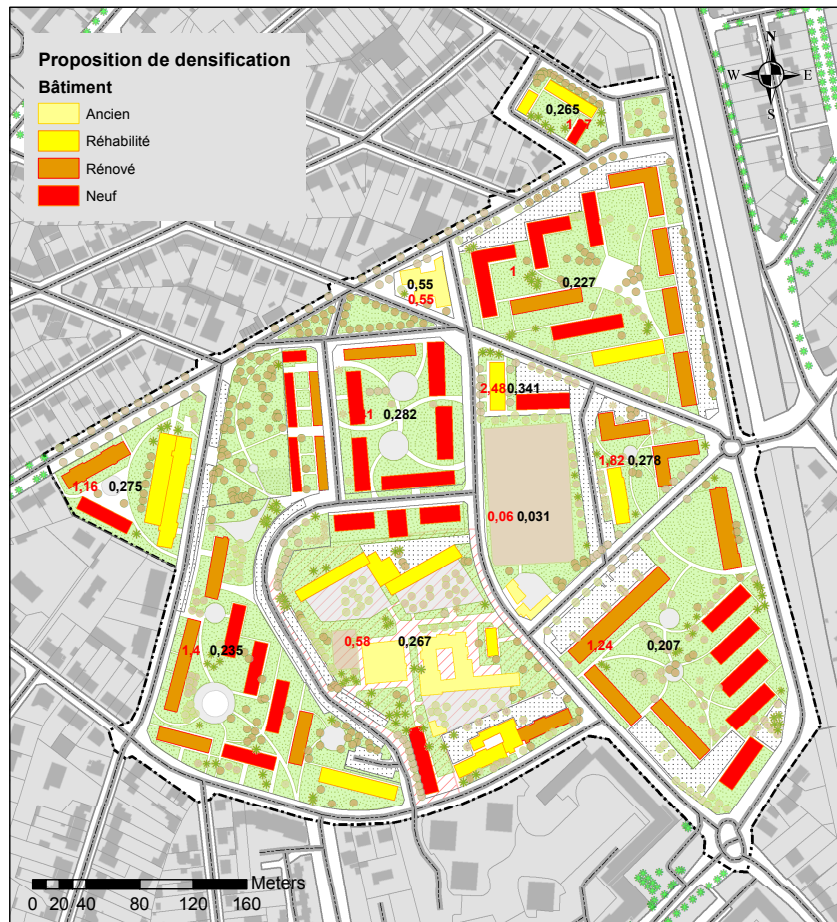


FIGURE 3.6: Plan Masse Proposition Pin Sec

Type d'intervention

Dans le quartier de Pin Sec, le projet d'aménagement et de densification urbain proposé combine des opérations de rénovation et de réhabilitation urbaine. *La rénovation urbaine* implique dans un immeuble ou quartier une opération de remodelage complet. Cette type d'intervention peut entraîner des opérations de démolition partielle ou complète suivies d'une reconstruction [De Gaspérin, 2006].

Dans la proposition du plan masse nous proposons d'appliquer, la rénovation aux immeubles les plus longs. L'intervention consiste à couper les barres de manière à ouvrir les îlots et les rendre plus perméables au vent. L'ouverture des îlots aux écoulements d'air favorise le mélange d'air et donc une répartition des effets rafraichissants des arbres aux couches d'air plus proches des bâtiments. Dans la proposition de rénovation du quartier, une partie des îlots a donc subi une transformation importante. L'objectif de l'intervention et de créer

une intensification⁸ et une densification du quartier. De nouveaux immeubles sont alors conçus tout en respectant la qualité des espaces extérieurs et les conditions imposées par le PLU (exposé précédemment).

De la même manière, au niveau du bâtiment, les opérations adoptées sont la rénovation et la réhabilitation. L'amélioration du cadre bâti est faite par des opérations de réhabilitation. Celle-ci permet une préservation des caractéristiques héritées qui sont insérées dans le nouveau fonctionnement du logement de manière à répondre aux enjeux du temps présent[De Gaspérin, 2006].

Ce type d'intervention est adopté de manière à adapter les logements aux nouvelles conditions de performance thermique de la réglementation. La réhabilitation des bâtiments est faite donnant une priorité aux stratégies d'application des dispositifs végétaux pour la construction du scénario.

Dans le plan masse proposé (Figure 3.6), malgré la densification et l'augmentation du CES, le cœur de l'îlot est conservé comme une zone verte. Les zones de parking actuelles qui se trouvent au sud, est et ouest, sont déplacées du côté nord de l'îlot afin de libérer ces zones pour accueillir de la végétation et protéger les façades les plus exposées au rayonnement solaire.

L'orientation et la hauteur des nouveaux immeubles sont pensées pour favoriser l'exposition des façades aux rayonnements solaires pendant la période d'hiver. La protection pendant l'été est assurée par les stratégies d'application des dispositifs végétaux.

3.2.3 Proposition des dispositifs végétaux

La gestion des vents dominants saisonniers est faite principalement à travers des stratégies d'implantation des arbres. L'implantation des arbres conifères est proposée comme barrière contre les flux de vent froids provenant d'est et du nord-est (ENE) pendant l'hiver. Les conifères agissent comme des brise-vent. Il est important de vérifier que la protection contre le vent en hiver n'empêchent pas l'ensoleillement des surfaces en été.

Dans la carte 3.7 les parcs et les arbres d'alignements sont représentés par point dans une même couche (données vectorielles type point), une autre couche est formée par les différents types de façades végétales (données vectorielles type ligne) et une dernière couche est créée pour les différents types de toiture végétale (données vectorielles type polygone). L'expression de chaque type de dispositif est fait grâce aux attributs où l'on définit dans chacun. Par

8. «L'intensification ne passe pas nécessairement par une densification du bâti. Intensifier, c'est utiliser mieux et d'avantage les espaces urbains existants, qui souvent ne sont pas assez utilisés par rapport à leur potentiel. C'est donner plus de destinations, plus d'occasions de croisement, plus de possibilités d'activité, plus de monde. Il y a beaucoup de possibilités d'obtenir un tel résultat sans ajout de mètres carrés supplémentaires». Vincent Fouchier (Directeur général adjoint de l'institut d'aménagement et d'urbanisme de l'Ile-de-France)[Charmes, 2010]

exemple, les façades végétales type revêtement sont représentées en jaune, les brise-soleil en rose et les éléments de façade en rouge. Les arbres d'alignement sont représentés par des points verts pour le feuillus et en étoiles orange-vert pour les conifères et les arbres existants sur le site sont représentés en marron. On propose un re-densification végétale des zones à l'intérieure des îlots.



FIGURE 3.7: Proposition des dispositifs végétaux sur Pin Sec

Ensoleillement en été et en hiver

La Figure 3.8 montre l'ensoleillement au sol pendant la période d'été et pendant la période d'hiver. On remarque que les façades exposées au sud ne reçoivent pas la protection de l'ombre des bâtiments voisins, cette protection doit être assurée pendant la période d'été par la végétation proposée. Pendant la période d'hiver, la hauteur des nouveaux bâtiments cherche à favoriser un

ensoleillement de façades de bâtiments voisin avec une configuration en gradin.

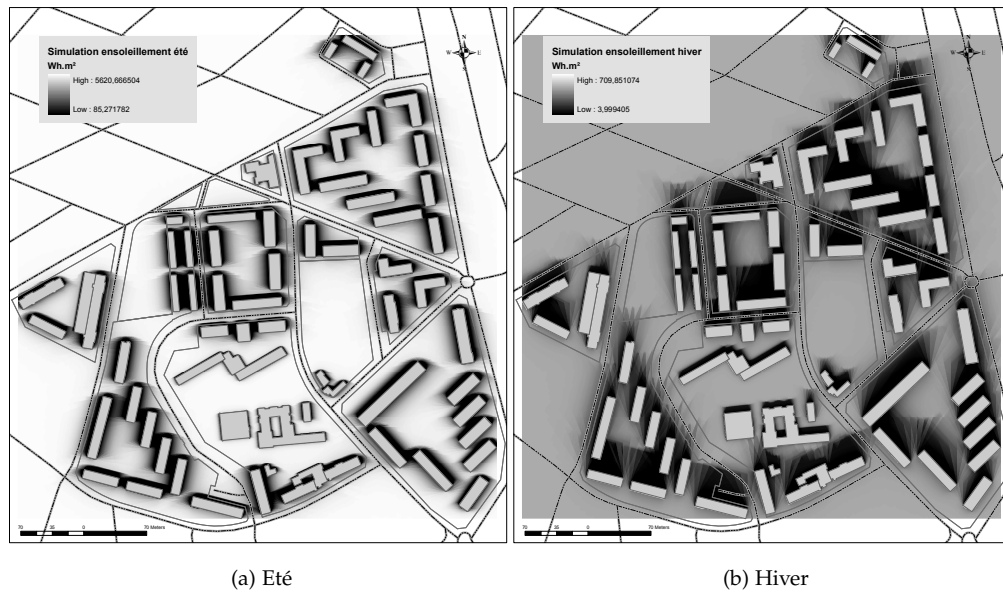


FIGURE 3.8: Simulation d'ensoleillement sur la proposition de plan masse à Pin Sec

3.3 PROPOSITION D'UN OUTIL D'ÉVALUATION DES SCÉNARIOS

3.3.1 *Free-Running* : Stratégie de rafraîchissement par système passif

Le concept de *free-running temperature* est défini comme la température obtenue à l'intérieur du bâtiment en absence de contrôle climatique et avec un minimum d'échange d'air avec l'extérieur. Le *free-running temperature* ne tient pas compte des changements de températures dus aux perturbations aléatoires comme l'occupation, la ventilation, etc. Il est donc directement révélateur de la performance du bâti. Dans cette hypothèse, on peut affirmer que pour un point d'équilibre donné, la différence entre la température du bâtiment *free-running* et la température extérieure est fonction de l'heure [Ghiaus and Rosales, 2007].

La Figure 3.9 permet de visualiser les degrés-heures nécessaires pour mettre au point une stratégie passive ou un système mécanique, pour le chauffage ou pour la climatisation, selon les conditions données dans les Tableaux 3.3 et 3.4, avec :

T_{cu} : Température supérieure acceptée,

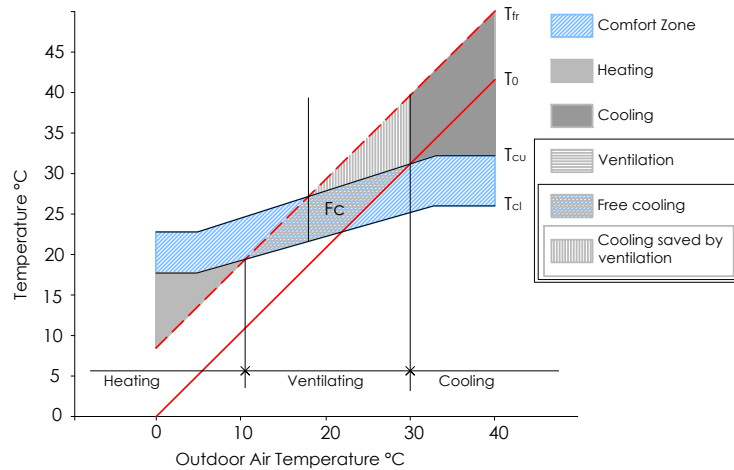


FIGURE 3.9: Stratégie de régulation pour la climatisation, confort et chauffage d'un bâtiment free-running avant et après avoir désigner une stratégie passive ($T_{st} < T_{fr}$) [Ghiaus and Rosales, 2007]

T_{cl} : Température inférieure acceptée,

T_{fr} : Température inférieure free-running du bâtiment,

T_{st} : Température après stratégie de régulation passive,

T_0 : Température extérieure.

Dans la Figure 3.9 on peut déduire que le système de chauffage est nécessaire lorsque T_{fr} en-dessous de T_{cl} et le système de climatisation est nécessaire lorsque T_0 et T_{fr} sont en-dessus de T_{cu} . Entre les températures nécessaire pour le chauffage et la climatisation il est possible d'adopter un système de ventilation passive.

Sur le principe de free-running, on peut utiliser le concept de free-cooling. Ce concept représente la capacité d'un bâtiment d'assurer le confort à l'intérieur sans faire appel à un système de climatisation. Une manière de mesurer cette capacité est en utilisant la méthode du «bin» dans laquelle la consommation annuelle du bâtiment est évaluée par différents intervalles de température et période. Cette-ci est exposée ci-après.

Stratégie	Condition	Degré-heure
Climatisation, avant stratégie passive	$\delta_{mc}^{fr} = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{fr} > T_{cu} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	$dh_{mc}^{fr} = (T_{fr} - T_{cu})\delta_{mc}^{fr}$
Climatisation, après stratégie passive	$\delta_{mc}^{st} = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{st} > T_{cu} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	$dh_{mc}^{st} = (T_{st} - T_{cu})\delta_{mc}^{st}$
Degré-heure en économie d'énergie avec la stratégie passive	$dh_{mcsave} = dh_{mc}^{fr} - dh_{mc}^{st}$	

Tableau 3.3: Économies d'énergies en climatisation par stratégie passive

3.3.2 Estimation des degrés-heures par la méthode «bin»

La méthode «bin» permet d'estimer la consommation d'énergie à partir d'une série de valeurs de températures extérieures et du nombre d'heures dans des intervalles de temps. La méthode «bin» est une procédure où les données météo sont triées par groupes ou *bins* des conditions. Cette méthode tient compte des variations des conditions météo dans l'estimation de la performance des systèmes passives et non passives de chauffage, climatisation et ventilation. La méthode permet ainsi de calculer les charges d'énergie pour chaque *bin* de condition ou le total de charges requises.

L'estimation des degrés-heures par la méthode «bin» est donnée par le concept de température d'équilibre T_b , comme température de référence. C'est-à-dire que pour le rafraîchissement du bâtiment, la température d'équilibre T_b , est la température intérieure de consigne en équilibre avec la température extérieure et dans le seuil de température de confort T_{cu} . Pour cette température T_b , les apports énergétiques sont égaux aux pertes. Le bilan énergétique est représenté par l'Equation 3.2 [Ghiaus and Allard, 2006] :

$$q_{gain} = K_{tot}(T_b - T_{cu}) \quad (3.2)$$

Avec :

q_{gain} : Gain de chaleur [W] ,

K_{tot} : Coefficient de pertes [W/K],

Stratégie	Condition	Degré-heure
Chauffage, avant stratégie passive	$\delta_h^{fr} = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{fr} < T_{cl} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	$dh_h^{fr} = (T_{fr} - T_{cl})\delta_h^{fr}$
Chauffage, après stratégie passive	$\delta_{mc}^{st} = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{st} < T_{cl} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	$dh_h^{st} = (T_{st} - T_{cl})\delta_h^{st}$
Degrés-heure en économies d'énergie avec la stratégie passive	$dh_{hsave} = dh_h^{st} - dh_h^{fr}$	

Tableau 3.4: Économies d'énergie en chauffage par stratégie passive

T_b : Température d'équilibre [K],

T_{cu} : Limite supérieure de température de confort [K].

A partir de l'équation 3.2 on obtient la température d'équilibre 3.3 :

$$T_b = T_{cu} + \frac{\mathcal{G}_{gain}}{K_{tot}} \quad (3.3)$$

Et l'énergie nécessaire pour la climatisation ou le rafraîchissement :

$$q_c = \begin{cases} K_{tot}(T_0 - T_b) & \text{si } T_0 > T_b \\ 0 & \text{si } T_0 \leq T_b \end{cases} \quad (3.4)$$

T_0 : est la température extérieur.

L'énergie totale nécessaire pour la climatisation est alors :

$$Q_c = \int_{t_{ini}}^{t_{fin}} K_{tot}(T_0 - T_b)\delta_c dt, \quad (3.5)$$

qui peut s'exprimer comme la somme :

$$Q_c = \sum_i \sum_j K_{tot}(i, j)[T_0(i, j) - T_b(i, j)]\delta_c \Delta t(i), \quad (3.6)$$

Index i : Intervalle du temps (par exemple un mois donné),

Index j : *bin* des températures extérieures.

δ_c : Condition booléenne pour la climatisation ou le rafraîchissement :

$$\delta_c = \begin{cases} 1 & \text{si } T_0 > T_b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$$

Si l'intervalle de temps Δt est donné en heures, on peut en déduire les degrés heures pour la climatisation :

$$dh_c \equiv [T_0(i, j) - T_b(i, j)] \delta_c \Delta t(i) \quad (3.8)$$

L'inconvénient entre l'équation précédente et celle de la température d'équilibre T_b est que la température intérieure dans ce cas doit être contrôlée à une valeur consigne et non pas en *free-running*. Il est possible cependant d'utiliser la méthode «bin» avec les degrés heures en fonction de la température d'un bâtiment *free-running* T_{fr} . On suppose que pour un système de ventilation passive sous des critères de température de confort, la somme de déperditions et gains est égale à zéro.

La température d'équilibre T_b est remplacée par la température intérieure du bâtiment «free-running» T_{fr} . La température limite supérieure de confort T_{cu} est remplacée par la température extérieure T_0 , on obtient alors [Ghiaus and Allard, 2006] :

$$T_{fr} = T_0 + \frac{g_{gain}}{K_{tot}} \quad (3.9)$$

Le degré-heure pour le rafraîchissement ou climatisation sera donné par l'équation 3.10 :

$$dh_c = (T_{fr} - T_{cl}) \delta_c \quad (3.10)$$

Avec

$$\delta_c = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{fr} > T_{cl} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.11)$$

T_{cl} : Limite inférieure de la température de confort.

Suivant cette logique on peut estimer le degré-heures pour un rafraîchissement passif. Si la température extérieure T_0 est plus basse que la température de confort limite supérieure T_{cu} et que la température du bâtiment «free-running» T_{fr} est plus élevée que T_{cu} [Ghiaus and Allard, 2006], ainsi :

Description	Total Degrés-Heures / Intégrale Degrés-Heures pour un «Bin»
Rafraîchissement	$DH_c(T_0) \equiv DH_c(j) = \sum_i [T_{fr}(i, j) - T_{cl}(i, j)] \delta_c$ $DH_c = \sum_j \sum_i [T_{fr}(i, j) - T_{cl}(i, j)] \delta_c$
Rafraîchissement passif	$DH_{fr}(T_0) \equiv DH_{fr}(j) = \sum_i [T_{fr}(i, j) - T_{cu}(i, j)] \delta_{fr}$ $DH_{fr} = \sum_j \sum_i [T_{fr}(i, j) - T_{cu}(i, j)] \delta_{fr}$
Système de climatisation	$DH_{mc}(T_0) \equiv DH_{mc}(j) = \sum_i [T_{fr}(i, j) - T_{cu}(i, j)] \delta_{mc}$ $DH_{mc} = \sum_j \sum_i [T_{fr}(i, j) - T_{cu}(i, j)] \delta_{mc}$

Tableau 3.5: Degrés-Heures et Degrés-Heures pour un «Bin»

$$dh_{fr} = (T_{fr} - T_{cu})\delta_{fr} \quad (3.12)$$

$$\delta_{fr} = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{fr} > T_{cu} \text{ et } T_0 < T_{cu} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.13)$$

Si $\delta_{fr} = 0$ le système de climatisation est alors nécessaire.

Le Tableau 3.5 résume les équations de la somme de degrés-heures pour le rafraîchissement, rafraîchissement passif et le système de climatisation.

Pour une séquence de jours, à une heure donnée, la somme de degrés heures, est obtenue par l'équation 3.14.

$$DH(j) = \sum_i [\Delta T(i, j)] \delta \quad (3.14)$$

$DH(j)$: Somme des degré-heures (d'un intervalle de temps) à une heure d'analyse donné,

$\Delta T(i, j)$: Différence de température de l'intervalle de temps (jour) i , et l'heure d'analyse j donné,

δ : Condition booléenne.

La méthode de degré-jour et free-running par rapport à l'objet d'étude dans cette recherche de master, permettrait de mesurer l'impact des dispositifs

mis en place. La température du bâtiment free-running serait alors celle du bâtiment avec le ou les dispositifs adoptés. A Pin Sec, des mesures de la température extérieure sont faites en permanence. C'est-à-dire que l'on compte avec des données nécessaires pour le calcul de degré-heure. Il faudrait alors prendre des mesures de la température à l'intérieur des logements dans l'état actuel. Lors de la proposition des dispositifs, les données de température intérieure pourraient être obtenues soit à travers des simulations ou bien par des mesures. Ceci permettrait alors de comparer des degrés-heures dans un bâtiment avec ou sans la végétation.

3.3.3 *Évaluation de la performance énergétique d'un bâtiment*

Il existe des logiciels de simulation permettant d'évaluer la performance énergétique des bâtiments, parmi lesquelles on peut citer DOE-2, COMIS et TRNSYS. Ceux-ci permettent d'estimer la consommation énergétique en chauffage et climatisation, mais ils n'indiquent pas quelles sont les stratégies pour améliorer sa performance.

La performance énergétique du bâtiment ainsi que la régulation du chauffage, climatisation et ventilation, dépendent de trois facteurs :

1. Caractéristiques thermiques du bâtiment
2. Critères de confort
3. Conditions climatiques du site

Dans l'évaluation de la performance énergétique du bâtiment, par la méthode de free-running et degré jours, le premier facteur, peut être synthétisé par la différence entre la température intérieure du bâtiment «free-running» et la température extérieure. Cette évaluation va donc dépendre directement des pertes thermiques, du débit de ventilation, des gains solaires et internes, de la masse thermique et de l'occupation [Ghiaus, 2003]. Dans cette évaluation, les effets des dispositifs végétaux s'ajoutent comme un élément modifiant le bilan énergétique.

Le confort thermique varie dans une gamme de températures en fonction de la température moyenne extérieure. Cette gamme de températures est plus large dans les bâtiments ventilés de manière naturelle par rapport aux bâtiments fonctionnant avec un système de climatisation. Dans le dernier facteur, les conditions climatiques peuvent être caractérisées par la distribution de fréquence de la température extérieure. Celle-ci aussi affectée par les effets des dispositifs végétaux.

Cette approche permet donc de saisir les conditions intérieures appropriées pour les stratégies en chauffage et climatisation en fonction de : la température intérieure du bâtiment *free-running*, du confort intérieur, de la température extérieure et de la distribution statistique de la température extérieure, par heure et par mois (voir Figure 3.9).

CONCLUSIONS

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments pourrait être atteinte à travers l'adoption de mesures alternatives plus économiques et écologiques. L'application de dispositifs végétaux comme stratégie de réhabilitation et rénovation urbaine et du bâtiment apparaît comme une solution durable.

L'objectif de ce stage de master, consistait tout d'abord à faire l'état de l'art du rôle de la végétation sur la consommation énergétique des bâtiments dans le but de proposer des stratégies pour des économies d'énergie dans le bâtiment. Ceci permettrait ensuite d'avoir des outils pour l'application des dispositifs et la construction des scénarios de végétation sur un quartier à travers un SIG.

De cette manière, l'analyse bibliographique a permis de reconstituer les effets directs et indirects d'un nombre de dispositifs végétaux (parcs, arbres d'alignement, toitures et façades végétalisées) sur le microclimat et sur la consommation énergétique des bâtiments. Dans cette étape, les paramètres ayant une influence sur le comportement de la végétation face aux conditions environnantes, ont été mises en avant.

Les façades des bâtiments sont les éléments où les échanges thermiques ont principalement lieu. La végétation génère sur les éléments de façade et de toiture une altération du bilan énergétique à travers divers mécanismes. Les effets d'ombre produit par la végétation, réduisent les gains de chaleur, ainsi que l'écart de température entre la surface et l'air environnante, par conséquent les transferts du flux de chaleur à travers de la paroi sont limités. Les effets de la végétation peuvent cependant devenir défavorables pendant la période d'été, étant donné que le refroidissement produit par les échanges de grande longueur d'onde avec le ciel pendant la nuit sont moins importantes.

Des critères d'application des dispositifs végétaux ont été développés à partir de l'analyse bibliographique. Le processus de construction du scénario sur un SIG a été développé en proposant tout d'abord une densification du quartier, suivi des stratégies d'application des dispositifs.

Discussions

Ce travail de master est développé à partir d'une recherche bibliographique. L'analyse des études réalisées autour des effets de la végétation sur le microclimat et sur la performance du bâtiment nous a dotée d'outils pour la construction d'une méthodologie d'application des dispositifs végétaux. Cette démarche met cependant en question le fait que les stratégies proposées ne sont pas évaluées ou validées à travers des résultats mesurés ou simulés.

Les dispositifs végétaux ont été choisis parmi une diversité utilisée au niveau urbain et au niveau du bâtiment ; les techniques, la composition, les modes de gestion qui les rendent finalement possible d'être adoptés dans un projet d'aménagement urbain, sont des aspects qu'ont été négligés. De la même manière, la sélection des critères d'application de ces dispositifs ne prennent pas en considération d'autres critères qui ont aussi une importance à l'heure de la création et construction d'un projet de végétalisation urbaine ; on pourrait citer par exemple des critères de confort et d'ambiance. Ainsi, le scénario proposé reste un cas fictif.

Par ailleurs, Il est nécessaire de traduire les indicateurs que définissent les critères d'application dans un langage SQL de manière à faciliter la tâche des utilisateurs à l'heure de construire un scénario de végétation sur un SIG. L'application de certains dispositifs végétaux exige une utilisation des données géographiques en 3D et un traitement des faces comme des identités. Ceci est le cas des façades végétalisées où la composition détermine aussi la possibilité d'application du dispositif.

L'outil d'évaluation des stratégies adoptées pour la construction des dispositifs proposés reste à explorer. Cela demande d'abord une étape de simulation pour avoir les données nécessaires avant et après la construction du scénario et pouvoir ainsi comparer les résultats des mesures adoptées.

Perspectives

L'incorporation de stratégies d'application des dispositifs sur un outil de simulation est nécessaire pour leur évaluation. Ceci demande une sélection des dispositifs végétaux plus détaillée ainsi qu'une proposition de typologies plus exhaustives et pertinentes sous des critères d'économies d'énergie dans les bâtiments.

D'autre part, l'intégration de la végétation dans les projets de réhabilitation devient aujourd'hui un outil pour l'amélioration du cadre de vie et en réponse aux enjeux environnementaux et énergétiques des centres urbains déjà denses ou en perspectives d'une densification. Dans le cadre de ce rapport, le scénario de végétation est proposé sur un fragment urbain peu dense et déjà végétalisé. Il serait intéressant de tester les effets de la végétation dans des zones urbaines plus denses et peu végétalisées.

A.1 CONDITIONS DES SIMULATIONS POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS
DU FRAGMENT URBAIN

TYPE DE CONFIGURATION	DESCRIPTION
Cas base A	
<i>A</i>	Seulement des constructions
<i>AT</i>	Avec des arbres d'alignement
Cas base B	
<i>B</i>	Parc de $10m \cdot 10m$
<i>BB</i>	Direction du vent à 45°
<i>B24</i>	Vent fort ($2.4m.s^{-1}$)
<i>B24 – 30</i>	Vent fort et température de l'air à $30^\circ C$
Cas base C	
<i>C1</i>	Parc de $14m.14m$
<i>C2</i>	Parc de $18m.18m$
<i>C1T</i>	Parc avec de la végétation tropical
Cas base D	
<i>D1</i>	Bâtiments et parc de $14m.14m$
<i>DD</i>	Direction du vent à 45°
<i>D2</i>	parc de $18m.18m$
<i>D1T</i>	Avec de la végétation tropical

Tableau A.1: Configuration des Cas d'études pour la simulation

A.2 RÉSULTATS DES SIMULATIONS DES TOITURES VÉGÉTALES ET NON VÉGÉTALES SUR TRNSYS

Isolation	Scenario	U-value ($Wm^{-2}k^{-2}$)	Demande en chauffage ($kWhm^{-2}$)	Demande en climatisation ($kWhm^{-2}$)			Total demande par an ($kWhm^{-2}$)		
				I	II	III	I	II	III
Toiture non végétalisé			I-II-III	I	II	III	I	II	III
Non Isolé	A1	18,18	42	116	111	107	158	153	149
	A2	12,56	42	100	93	88	142	135	130
	A3	9,59	42	88	80	74	130	122	116
	A4	7,76	41	79	71	64	120	112	105
Isolation modéré	A5	0,8	15	57	44	36	72	59	51
	A6	0,77	15	56	42	33	71	57	48
	A7	0,74	15	55	41	32	70	56	47
Bien Isolé	A8	0,4	12	53	38	29	65	50	41
	A9	0,39	12	53	38	29	65	50	41
	A10	0,26	11	52	37	28	63	48	39
Toiture végétalisé			I-II-III	I	II	III	I	II	III
Non Isolé	B1	1,99	23	64	51	42	87	74	65
	B2	1,89	23	63	50	40	86	73	63
	B3	1,81	23	63	49	40	86	72	63
	B4	1,73	22	62	49	39	84	71	61
Isolation modéré	B5	0,59	13	55	40	32	68	53	45
	B6	0,57	13	55	40	31	68	53	44
	B7	0,55	13	55	41	31	68	54	44
Bien Isolé	B8	0,34	11	53	38	29	64	49	40
	B9	0,33	11	53	38	29	64	49	40
	B10	0,24	10	52	37	28	62	47	38

Tableau A.2: Résultat des simulations des toitures végétalisées et non végétalisées sur TRNSYS pour chaque des différents scénarios [Niachou et al., 2001]

A.3 VALEURS DU COEFFICIENT D'EXTINCTION κ_l EN FONCTION DE LA DISTRIBUTION DES FEUILLES

<i>Leafs distribution</i>	κ_l
Horizontal	1;1.05
Conical ($\alpha = 45^\circ$)	0.829
Vertical ($\alpha = 90^\circ$)	0.436
Spherical	0.684;0.81

Tableau A.3: Valeurs des coefficient d'atténuation pour le rayonnement grande longueur d'onde, représentant l'angle de distribution des feuilles. α est l'angle entre les feuilles et le plane horizontal.

[Palomo del Barrio, 1998]

BIBLIOGRAPHIE

- [Ait-Ameur, 2002] Ait-Ameur, K. (2002). Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains : Validation d'un système d'indicateurs morpho-climatiques et d'un indicateur de confort. *Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes*, pages 288.
- [Akbari et al., 1992] Akbari, H., Bretz, S., Hanford, J., Rosenfeld, A., Sailor, D., Taha, H., and Bos, W. (1992). Monitoring peak power and cooling energy savings of shade trees and white surfaces in the sacramento municipal utility district (smud) service area : Project design and preliminary results. Technical report, Lawrence Berkeley Lab., CA (United States).
- [Akbari et al., 2001] Akbari, H., Pomerantz, M., and Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3) :295–310.
- [Alexandri and Jones, 2008] Alexandri, E. and Jones, P. (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4) :480–493.
- [Allen et al., 2006] Allen, R., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M. (2006). Evapotranspiration del cultivo : Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Technical report, Organizacin De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación.
- [Allen et al., 1998] Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., et al. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, 300 :6541.
- [André Vézina, 2001] André Vézina, M. (2001). Les haies brise-vent. Technical report, Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Cours de formation continue n19. Consulté le 20/09/2011 sur http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Haies%20brise%20vent_OIFQ.pdf.
- [Anquetil, 2011] Anquetil, V. (2011). Evolution des formes de végétation dans la ville durable : approche historique et perspectives. Technical report, Plante et Cité, Angers. Version Provisoire mars.
- [Benzerzour, 2004] Benzerzour, M. (2004). Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique". *Thèse de doctorat, École Polytechnique de l'Université de Nantes*, pages 325.
- [Bouyer, 2009] Bouyer, J. (2009). Modélisation et simulation des microclimats urbains - etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. *Thèse de doctorat, École Polytechnique de l'Université de Nantes*, pages 306.
- [Charmes, 2010] Charmes, E. c. p. (2010). La densification en débat. Effet de mode ou solution durable. *Etudes Foncières*, (145) :19–37. Consulté le 20/09/2011 sur http://www.adeq.org/BDD/RE/145/EF_145_dossier.pdf.

- [De Gaspérin, 2006] De Gaspérin, A. (2006). Rénovation et réhabilitation des grands ensembles dans les nouveaux länder : quel avenir pour la ville socialiste? *Revue Géographique de l'Est*, 46 :1–23.
- [Dimoudi and Nikolopoulou, 2003] Dimoudi, A. and Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment : microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings*, 35(1) :69–76.
- [Esri France, 2011] Esri France (2011). Les SIG. Consulté le 20/09/2011 sur <http://www.esrifrance.fr/sig3.asp>.
- [Ghiaus, 2003] Ghiaus, C. (2003). Free-running building temperature and hvac climatic suitability. *Energy and buildings*, 35(4) :405–411.
- [Ghiaus and Allard, 2006] Ghiaus, C. and Allard, F. (2006). Potential for free-cooling by ventilation. *Solar Energy*, 80(4) :402–413.
- [Ghiaus and Rosales, 2007] Ghiaus, F. A. and Rosales, M. (2007). Potential of passive design strategies using the free-running temperature. In *2nd PALENC conference and 28th AIVC Conference on Building low energie coolling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century*, pages 850–854.
- [Gil Pelegrín et al., 2005] Gil Pelegrín, E., Aranda, I., Vilagrosa Carmona, A., and Peguero-Pina, J. (2005). El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 14(3) :358–370.
- [Gobron and Verstraete, 2009] Gobron, N. and Verstraete, M. (2009). LAI leaf Area Index. Technical report, GTOS Secretariat Land and Water Division (NRL) Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Consulté le 20/09/2011 sur <http://www.fao.org/gtos/doc/ECVs/T11/T11.pdf>.
- [Guyot, 1997] Guyot, G. (1997). *Climatologie de l'environnement : de la plante aux écosystèmes*. Masson.
- [Hervé, 2005] Hervé, P. (2005). Mesure de l'émissivité thermique. In *Measures - Analyses - Thermométrie sans contact*, number R2737. Techniques de l'ingénieur.
- [Hsie and Ward, 2006] Hsie, T. and Ward, I. (2006). A gis-based method for determining natural ventilation potentials and urban morphology. In *PLEA2006 the 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Genève 6-8 septembre 2006*, page 6.
- [IGN, 2009a] IGN (2009a). *BD PARCELLAIRE Version 1.1*. Institut Geographique Nationa IGN.
- [IGN, 2009b] IGN (2009b). *BD TOPO Version 2*. Institut Geographique Nationa IGN.
- [Jim and Tsang, 2010] Jim, C. and Tsang, S. (2010). Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*, pages 1263–1274.
- [Kjelgren and Montague, 1998] Kjelgren, R. and Montague, T. (1998). Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment*, 32(1) :35–41.

- [Malys, 2009] Malys, L. (2009). Modélisation climatique des façades végétales : caractéristiques radiatives des couvertures végétales de façades. *Mémoire de master, CERMA École National Supérieur d'architecture de Nantes*, pages 93.
- [Maïzia, 2008] Maïzia, M. (2008). Energie, réseaux et formes urbaines. *Cahiers de l'IAURIF*, 147 :174-179.
- [Medina R, 2011] Medina R, E. (2011). Transpiración Vegetal. Diapositives Sur Le Processus De Transpiration En Linea al instituto Pedagógico Rural Gervasio Rubio - Departamento Agro-industrial. Consulté le 20/09/2011 sur <http://fvupeliiprgr.galeon.com/lfv2.pdf>.
- [Niachou et al., 2001] Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., and Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and building*, 33 :719-729.
- [Oke, 1987] Oke, T. (1987). *Boundary layer climates*, volume 632. Routledge.
- [Palomo del Barrio, 1998] Palomo del Barrio, E. (1998). Analysis of the green roofs coolings potential in buildings. *Energy and building*, 27 :179-193.
- [Sanchez de la Flor, 2002] Sanchez de la Flor, F. (2002). Modificaciones microclimáticas inducidas por el entorno del edificio y su influencia sobre las demandas energéticas del acondicionamiento. *Thèse de doctorat, Escuela Superior de ingenieros Universidad de Sevilla*, pages 235. Consulté le 20/09/2011 sur <http://fondosdigitales.us.es/media/thesis/94/DT250.pdf>.
- [Sanchez de la Flor and Alvarez Dominguez, 2004] Sanchez de la Flor, F. and Alvarez Dominguez, S. (2004). Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings. *Energy and buildings*, 36(5) :403-413.
- [Tahi, 2008] Tahi, H. (2008). Efficience de l'utilisation de l'eau d'irrigation chez la tomate par la technique de PRD (Partial Rootzone Drying) et étude des mécanismes physiologiques et biochimiques impliqués. *Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad de Marrakech*, pages 185. Consulté le 20/09/2011 sur <http://www.aesvt-maroc.org/file/85179/>.
- [Ville de Nantes, 2007] Ville de Nantes (2007). Plan local d'urbanisme PLU. Document Approuvé.
- [Vinet, 1999] Vinet, J. (1999). Greencode : Reglementary frame for renewable energy use in urban side through vegetation planning and strategic surfaces. Technical report, CERMA-UMR CNRS 1563 Ecole d'architecture de Nantes.
- [Whitford et al., 2001] Whitford, V., Ennos, A., and Handley, J. (2001). City form and natural process : indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 57(2) :91-103.
- [Wong et al., 2010] Wong, N., Kwang Tan, A., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P., Chan, D., Chiang, K., and Wong, N. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(3) :663-672.