



Rapport final Projet ANR- 09-VILL-0007 VegDUD Programme Villes Durables 2009

Marjorie Musy, Emmanuel Bozonnet, Xavier Briottet, Caroline Gutleben,
Jean-Pierre Lagouarde, Patrick Launeau, Aude Lemonsu, Denis Maro, Fabrice
Rodriguez, Maeva Sabre

► To cite this version:

Marjorie Musy, Emmanuel Bozonnet, Xavier Briottet, Caroline Gutleben, Jean-Pierre Lagouarde, et al.. Rapport final Projet ANR- 09-VILL-0007 VegDUD Programme Villes Durables 2009. [Rapport de recherche] IRSTV FR CNRS 2488. 2014. hal-01188804

HAL Id: hal-01188804

<https://hal.science/hal-01188804>

Submitted on 5 Oct 2015

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.

Rapport final
Projet ANR- 09-VILL-0007
VegDUD
Programme Villes Durables 2009

Auteurs : Marjorie Musy (IRSTV/ensa nantes), Emmanuel Bozonnet (LaSIE/Université de La Rochelle), Xavier Briottet (DOTA/ONERA), Caroline Gutleben (Plante & Cité), Jean-Pierre Lagouarde (EPHYSE /INRA), Patrick Launeau (LPGN/Université de Nantes), Aude Lemonsu (GAME/CNRM), Denis Maro (LRC/IRSN), Fabrice Rodriguez (IFSTTAR), Maeva Sabre (CSTB)

Date de rendu : 29 Mai 2014

A. Identification	4
B. Rappel du positionnement du projet	5
1. Contexte et enjeux économiques, environnementaux et sociétaux	5
2. Positionnement du projet.....	7
3. Etat de l'art initial	8
C. Bilan d'activité par volet.....	11
1. Coordination du projet	11
<i>Accord de consortium.....</i>	<i>11</i>
<i>Assemblées générales.....</i>	<i>11</i>
<i>Comités de coordination</i>	<i>12</i>
<i>Diffusion et communication</i>	<i>13</i>
<i>Restitution du travail des étudiants d'AgroCampusOuest</i>	<i>15</i>
<i>VegDUD day dans WGIC.....</i>	<i>15</i>
<i>Conférence finale.....</i>	<i>15</i>
<i>Autres actions de communication</i>	<i>15</i>
2. Volet 1 : TYPO – Typologie du végétal urbain (C. Gutleben, Plante&Cité, avec M. Musy,IRSTV/CERMA) 17	
<i>OBJECTIFS :.....</i>	<i>17</i>
<i>TYPO 1 – Mise en place d'une typologie de la végétation urbaine</i>	<i>17</i>
<i>TYPO 2 – La végétation urbaine collective : parcs, coulées vertes, continuités, aménagements, éléments de circulation, alignements d'arbres, végétation diffuse, contrôlée ou non.....</i>	<i>18</i>
<i>TYPO 3 – La végétation urbaine privée.....</i>	<i>21</i>
<i>TYPO 4 – Caractérisation des matériaux.....</i>	<i>23</i>
<i>TYPO 5 – La végétation des scénarios alternatifs.....</i>	<i>23</i>
<i>RESULTATS :</i>	<i>24</i>
3. Volet 2 : PHYSIO – Physiographie urbaine : Documentation et représentation du végétal urbain (N. Long,IRSTV/LIENSs)	25
<i>OBJECTIFS :.....</i>	<i>25</i>
<i>PHYSIO 1 – SIG environnemental collaboratif.....</i>	<i>25</i>
<i>PHYSIO 2 – Caractérisation des espaces verts par télédétection.....</i>	<i>27</i>
<i>PHYSIO 3 – Physiographie alternative</i>	<i>35</i>
<i>RESULTATS :</i>	<i>36</i>
4. Volet 3 : EXPE - Expérimentations (J.-M. Rosant,IRSTV/LHEEA, avec P. Mestayer,IRSTV).....	37
<i>OBJECTIFS :.....</i>	<i>37</i>
<i>EXPÉ 1 – Mesures en continu</i>	<i>37</i>
<i>EXPÉ 2 – Campagnes expérimentales.....</i>	<i>39</i>
<i>EXPÉ 3 – Télédétection aéroportée.....</i>	<i>46</i>
<i>EXPÉ 4 – Etudes sur maquettes</i>	<i>47</i>
<i>RÉSULTATS :</i>	<i>50</i>
5. Volet 4 : MODE - Représentation de la végétation dans les modèles climatiques, thermiques et acoustiques (C. Inard, LaSIE & H. Andrieu, IFSTTAR)	50
<i>OBJECTIFS :.....</i>	<i>50</i>
<i>MODE 1 – Modélisation des effets de dispositifs végétaux sur les facteurs physiques d'ambiance.....</i>	<i>52</i>

MODE 2 – Modélisation de l'impact de la végétation sur la consommation énergétique des bâtiments.....	53
MODE 3 – Modélisation de l'influence de la végétation sur la climatologie urbaine.....	55
RESULTATS :	57
6. Volet 5 : Eval - Evaluation des dispositifs végétaux (M. Musy,IRSTV/CERMA, avec F. Rodriguez, Ifsttar, E. Bozonnet, LaSIE, C. Gutleben, Plante & Cite)	59
OBJECTIFS :	59
Eval 1 – Scénarios alternatifs	59
Eval 2 – Influence climatologique.....	60
Eval 3 – Influence énergétique.....	65
Eval 4 – Influence hydrologique	71
Eval 5 – Influence sur les ambiances	78
Eval 6 – Influence sur les pratiques des bâtiments et des espaces verts.....	82
Eval 7– Acceptabilité - Réglementation	84
Eval 8 - Bilan Carbone.....	85
Eval 9 – Bilan global	86
RESULTATS :	89
7. Conclusion.....	91
D. Annexes	93
1. Annexe 1 : Documents relatifs au volet Coord	93
2. Annexe 2 : Documents relatifs au volet TYPO	93
3. Annexe 3 : Documents relatifs au volet PHYSIO	93
4. Annexe 4 : Documents relatifs au volet EXPE	93
5. Annexe 5 : Document relatifs au volet MODE	93
6. Annexe 6 : Document relatifs au volet Eval	93
E. Remerciements	94
F. Liste des participants au projet.....	95
G. Bibliographie	96

A. IDENTIFICATION

Acronyme du projet	VegDUD
Titre du projet	Rôle du végétal dans le développement urbain durable ; une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances
Coordinateur du projet (société/organisme)	IRSTV
Date de début du projet	1 ^{er} janvier 2010 – 31 mars 2014
Date de fin du projet (conventions)	
Site web du projet, le cas échéant	https://vegudud.irstv.fr (compte requis)

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Madame, Marjorie, Musy
Téléphone	02 40 59 17 18
Adresse électronique	Marjorie.musy@cerma.archi.fr
Date de rédaction	25 mai 2014

B. RAPPEL DU POSITIONNEMENT DU PROJET

1. CONTEXTE ET ENJEUX ECONOMIQUES, ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIETAUX

Développement urbain durable

Dans les Agendas 21 des grandes agglomérations françaises, sont inscrits des objectifs environnementaux forts comme : « rendre compréhensible et acceptable par tous la densification urbaine », « anticiper les effets du changement climatique » (Agenda 21 de Nantes Métropole).

Le premier traduit le principe admis selon lequel, pour limiter l'étalement urbain et les nuisances qui lui sont attribuées (consommation énergétique des déplacements urbains, émission de gaz à effet de serre, consommation d'espace, imperméabilisation des sols...), il faut reconstruire la ville sur elle-même, la densifier. Il souligne aussitôt qu'une densification mal organisée conduit à un environnement urbain dans lequel la qualité de vie risque de s'appauvrir. Il s'agit donc d'organiser cette densification pour la rendre acceptable, mais aussi, de l'expliquer, et de la justifier sur des critères objectifs et démontrés.

Le second objectif pointe l'évolution climatique et ses conséquences. Parmi celles-ci, s'impose, pour les grandes villes, la synergie d'un réchauffement climatique planétaire et d'un effet d'îlot de chaleur urbain avec les conséquences sanitaires dont nous avons pris conscience pendant l'été 2003. Si cette évolution n'est pas envisagée du point de vue de la planification urbaine, la réponse sera à dominante énergétique (rafraîchissement des bâtiments pour solutionner les nécessités sanitaires et les exigences de confort des citadins), mettant ainsi à mal les objectifs de réduction de la consommation énergétique des bâtiments.

Les deux objectifs environnementaux que nous venons de rappeler se traduisent dans la pratique des projets urbains par des interrogations récurrentes sur les rôles relatifs de la forme urbaine et du végétal. En effet, pour améliorer le confort d'été dans les villes, une des solutions avancée est l'accroissement de la place de la végétation. Simultanément, pour aider à maîtriser la dépense énergétique pour la climatisation et le chauffage des bâtiments, qui entraîne l'émission de gaz à effet de serre et de charges anthropiques qui participent à l'îlot de chaleur urbain, les solutions végétales appliquées aux enveloppes de bâtiments ou à l'espace urbain sont réputées efficaces. Ainsi, des techniques industrielles de façades et toitures végétales dont on avance les performances thermiques et climatiques sont d'ores et déjà disponibles, des projets de forêts urbaines sont annoncés et engagés.

Après une période où les opérationnels ont élaboré des réponses, observé les pratiques des autres, transposé, adapté, appris de leurs erreurs, un constat est fait : les approches ne peuvent être standardisées, mais au contraire, la diversité des voies est reconnue, justifiée par la diversité des villes, par leur histoire, leur type de développement, leur taille, leur patrimoine... Après les idées préconçues de départ, des controverses apparaissent et on s'interroge notamment sur l'intérêt réel, en termes de développement durable, d'une forte densité des villes. L'étude de l'impact de la densification est étroitement liée à celui de la végétalisation.

Enjeux climatiques

Le Giec a annoncé en 2013 un réchauffement global de 0,3 à 4,8 °C (par rapport à la période 1986-2005) pour la fin du XXI^e siècle, en fonction de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre¹ (GES). À ce réchauffement viennent s'ajouter les phénomènes d'îlot de chaleur urbain (ICU), de plus en plus étudiés. On sait qu'ils sont liés à la forme urbaine, aux matériaux et aux charges anthropiques dissipées dans le tissu urbain. Les dissipations thermiques des bâtiments participent de façon importante à l'amplification du réchauffement urbain et les systèmes de climatisation peuvent en représenter une part significative, d'autant plus que leur charge augmente avec le réchauffement. Outre les questions de confort, le phénomène d'ICU pose des questions sanitaires avec parfois des conséquences dramatiques, comme lors de la canicule de l'été 2003, qui a entraîné un surcroît de mortalité estimé à plus de 70 000 morts en Europe dont 20 000 en France (Robine *et al.*, 2007).

Le rôle de la densité dans ce phénomène est très délicat à étudier ; en effet, il est étroitement lié à celui des matériaux, en particulier de la végétation.

La végétation a un impact important sur le microclimat urbain. Les ombres portées sur les surfaces participent à la diminution des températures de surface et ainsi réduisent le stockage de chaleur dans les matériaux de construction et les transmissions dans les bâtiments. Ces températures de surface plus fraîches (végétales et minérales ombragées) améliorent les conditions de confort dans les espaces urbains en été.

¹ <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.UsgnYvZ58hQ>, consulté le 29 décembre 2013.

L'évapotranspiration de la végétation rafraîchit l'air en piégeant la chaleur sensible sous la forme de chaleur latente. La disposition des arbres modifie la circulation d'air en protégeant par exemple des courants froids les bâtiments en hiver, ou inversement en favorisant la ventilation naturelle en été.

La présence de végétation est également utilisée comme outil de gestion de l'eau, avec des aménagements qui permettent son stockage sur place plutôt que de l'évacuer directement vers les réseaux, afin de répondre à deux objectifs : limiter les risques de crues et éviter le coûteux surdimensionnement des réseaux. De plus, les arbres interceptent une partie de l'eau de pluie, limitant le phénomène de ruissellement et ses conséquences d'érosion, d'entraînement des polluants vers les réseaux.

Enjeux autour du facteur 4

Dans la plupart des grandes villes, l'amplification des phénomènes d'ICU entraîne une consommation supplémentaire d'énergie pour le rafraîchissement des bâtiments en été. La consommation d'énergie finale de la France et la part liée aux secteurs résidentiels et tertiaires se stabilisent depuis 2006 à des valeurs respectivement de 155 et 68 Mtep². Ces secteurs représentent 44 % des consommations d'énergie et 23 % des émissions de CO₂. Pour l'Europe, le conditionnement des espaces habités est estimé à 57 % de la demande énergétique. On lui associe également 33 % de la production de CO₂ du secteur bâtiment. Il faut en plus considérer qu'il est l'une des principales sources anthropiques responsables des phénomènes d'ICU.

Le secteur du bâtiment constitue donc une des clés pour le respect de l'engagement pris en 2003 de diviser par quatre d'ici 2050 les émissions nationales de gaz à effet de serre du niveau de 1990. Or, du point de vue technique, ce « facteur 4 » restera beaucoup plus facile à atteindre dans le bâtiment neuf que dans la rénovation, alors qu'il faut compter avec un stock important de bâtiments anciens dont l'amélioration des performances énergétiques devra être programmée sur plusieurs années.

Pour ces bâtiments, un des leviers consiste à agir sur le contexte climatique local afin de réduire la sollicitation thermique d'été. Cette solution, qui présente par ailleurs un caractère équitable et sanitaire, doit cependant être évaluée globalement, en termes de coûts, de durabilité, de bilan écologique et comparée à des solutions traditionnelles d'isolation et d'équipement thermique (énergies renouvelables par exemple).

Le végétal et l'ambiance de la ville

La végétation est déjà présente en milieu urbain sous forme de jardins privés, squares ou de parcs publics. Elle peut contribuer, en plus d'une vocation récréative et sociale, à résoudre les problèmes urbains comme l'assainissement des eaux pluviales, la pollution atmosphérique, le stockage du carbone, la dépollution des sols... Elle semble être devenue un élément incontournable pour satisfaire aux exigences environnementales mais aussi pour répondre à la volonté des sociétés d'un retour à la nature et à l'amélioration du cadre de vie.

Des enquêtes ont mis en évidence la demande sociale de nature. En 2008, l'Union Nationale des Entrepreneurs du Paysage (UNEP) et l'institut de sondage Ipsos, montrent le caractère désormais central de la végétation en ville : 7 Français sur 10 choisissent aujourd'hui leur lieu de vie en fonction de la présence d'espaces verts à proximité de leur habitation et 3 Français sur 4 fréquentent de façon périodique ou quotidienne, les espaces verts de leur commune. Si les raisons de cet engouement sont diverses, la volonté de se relaxer, de rencontrer les autres habitants et de pratiquer un sport est régulièrement avancée.

Par ailleurs, les enjeux de protection de l'environnement inscrits dans les objectifs de conception et de gestion durable des espaces verts urbains et péri-urbains (encadrement de l'usage de produits phytosanitaires) engendrent une évolution des modes de végétalisation urbaine, laissant plus de place à la flore spontanée et favorisant l'apparition de zones et d'espaces verts au sein des villes.

Ces nouveaux rapports entre ville et végétal participent à l'« ambiance urbaine », résultat d'éléments objectifs, mesurables, par exemple physiques et climatiques (morphologie, densité, minéralisation, microclimat urbain...) et d'éléments plus subjectifs qui varient selon les usages et les perceptions.

La réintroduction de la végétation dans la ville, simultanément à la densification, transforme les espaces de vie, les pratiques sociales et les relations de voisinage, générant une nouvelle forme de proximité entre les constructions et les citoyens, des proxémies sensibles qui méritent d'être mieux connues aujourd'hui pour être mieux anticipées demain. Comment cette réintroduction peut-elle être menée dans la perspective d'une construction durable et équitable de la ville ? La présence du végétal, nécessaire, ne peut être envisagée

² Mtep : million de tonne équivalent pétrole. Estimations d'après http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATTEF11347, consulté le 29 décembre 2013.

seulement à partir de son rôle climatique, mais aussi être pensée à partir des ambiances que le végétal offre pour les pratiques depuis des situations multiples (l'espace public et l'habitat), à différents moments.

2. POSITIONNEMENT DU PROJET

Positionnement du projet par rapport au contexte

Devant l'importance des enjeux environnementaux et sociaux précités, il semble indispensable de quantifier les effets des réponses qui impliquent la végétation dans la planification urbaine de manière à optimiser leur organisation, dans le temps et dans l'espace. Une telle quantification nécessite auparavant de répondre à des problématiques de recherche climatologique afin d'appréhender d'une manière fine les différents impacts hydriques, thermiques, aérauliques et radiatifs des surfaces urbaines végétalisées sur les microclimats, d'explicitier l'influence de la composition urbaine sur ces impacts et de formaliser les mécanismes d'échelles mis en jeu. Anticiper nécessite tout d'abord une approche d'état des lieux des pratiques actuelles et passées du végétal urbain et le recensement des alternatives, puis la mise au point de scénarios d'évolution de la place du végétal en lien avec l'évolution de la forme urbaine, et simultanément l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des scénarios.

Dès lors que l'on cherche à évaluer la pertinence d'une stratégie, il est nécessaire d'avoir une approche globale mais délimitée. La climatologie urbaine est en premier lieu une climatologie humaine, qui concerne une couche atmosphérique de quelques mètres d'épaisseur dans laquelle vivent les habitants auxquels les conditions de vie induites par l'aménagement doivent être adaptées, tant en termes sanitaires que de confort, de coût financier et d'usage. Compte tenu de la diversité des enjeux, comment évaluer la « durabilité » des projets urbains ? Il s'agit là d'une question au centre d'un grand nombre de projets de recherche, à laquelle nous ne prétendons pas apporter « la » réponse par ce seul projet. Toutefois, nous avançons l'hypothèse suivante : la réflexion pour le développement équitable d'un aménagement végétal dans un site urbain ne peut être isolée ni du contexte construit, environnemental et climatique dans lequel le citoyen se trouvera, ni de l'expérience plurisensorielle des utilisateurs et des usagers qui le borderont ou bien le traverseront. Nous aborderons cette problématique d'une manière appliquée, en centrant notre approche sur un élément constitutif de la ville - la végétation - et l'analyse croisée d'enjeux sélectionnés comme centraux. Les autres enjeux seront traités dans un second cercle, par une approche qui se limitera (pour des raisons pragmatiques de réalisation du projet) à évaluer les impacts et interactions.

Positionnement du projet par rapport aux autres projets

Compte tenu de son approche interdisciplinaire, le projet VegDUD doit être positionné par rapport à de nombreux projets de recherche passés et en cours, dans différents domaines : les projets ayant trait au végétal urbain, ceux relatifs à l'aménagement et aux ambiances et enfin, les projets centrés sur la climatologie urbaine. Nous ne pourrions ici décrire le lien entretenu entre notre proposition et ces travaux dans le détail. Nous avons dû restreindre l'exercice à ceux traitant spécifiquement du végétal et à nos travaux avec lesquels nous réaliserons des intersections.

Nous partions en 2010 d'un état de l'art assez faible sur le sujet, en dehors du programme **ECORURB** « comprendre les effets de l'urbanisation sur la biodiversité locale et sur l'émergence de risques biologiques » qui comportait une partie climatologie. Dans ECORURB, les objectifs sont de mettre en évidence le gradient climatique ville-campagne à Rennes et ses variations, d'analyser les effets du climat sur les différents types d'espèces végétales. Le couple climat-végétal est traité dans ECORURB par l'analyse de l'effet du climat sur la végétation.

Dans le projet ANR Villes Durables 2008 **TrameVerte** l'approche du végétal urbain est centrée sur les services écosystémiques, dans VegDUD sur les facteurs climatiques et énergétiques. Si les chercheurs se sont rencontrés à diverses occasions, les problématiques et terrains bien distincts n'ont pas suscité de réelles collaborations, si ce n'est lors de la rédaction de l'ouvrage final.

Simultanément à VegDUD, d'autres projets ont vu le jour.

Le projet ANR Habisol **AGROBAT** a démarré, coordonné par une partenaire du LaSIE. Ce projet ciblait explicitement les performances énergétiques de toitures végétales.

Le CNRM coordonnait le projet **MUSCADE** qui envisage également l'évolution des villes, mais essentiellement des points de vue climatiques et énergétiques. Les rôles du végétal n'y sont pas centraux.

3. ETAT DE L'ART INITIAL

Pour ce projet, nous partions d'une très abondante littérature scientifique qui expose et quantifie, dans des contextes particuliers (climat, forme urbaine), les performances de la végétation urbaine par rapport aux différentes fonctions qui peuvent lui être attribuées : climatiques, énergétiques, ambiantales, sociales, économiques... Il est difficile de faire une synthèse précise de ces travaux dans un volume raisonnable. Nous nous limitons donc ici à quelques travaux, sur lesquels nous pouvons nous appuyer pour justifier de l'intérêt de notre projet en traçant un panorama des grands résultats concernant l'impact environnemental de la végétation en ville.

Il est montré que la végétation abaisse la température des surfaces et de l'air par effet d'ombrage et par l'évapotranspiration. (Akbari et al., 1997) relèvent sur les surfaces ombragées des températures de 11 à 25°C inférieures à celles des surfaces au soleil. (Sandifer and Givoni, 2002) observent des réductions de températures de surface de bâtiments supérieures à 20°C là où des vignes grimpent. (Scott et al., 1999) trouvent que l'ombrage des parkings par des arbres permet d'abaisser les températures à l'intérieur des véhicules de 25°C. Diverses études relèvent une diminution locale de la température de l'air, attribuée au phénomène d'évapotranspiration seul ou associé à l'ombrage. Ces valeurs varient très fortement : (Huang et al., 1990) indiquent un intervalle de 1 à 5°C pour un couvert d'arbres, (Kurn et al., 1994) des températures au dessus d'un terrain de sport gazonné de 1 à 2°C plus basses qu'au dessus des surfaces environnantes.

Des études à plus grande échelle montrent que dans des zones périurbaines arborées avec des sujets âgés, on relève des températures inférieures à celles relevées dans les zones périurbaines sans arbre (Kurn et al., 1994). Ces impacts sur le microclimat sont assez mal représentés dans les modèles climatiques et microclimatiques. La végétation y est modélisée de manière partielle ou idéale : ce sont soit les représentations géométriques qui sont mal adaptées, soit celle des phénomènes à prendre en compte : rayonnement, convection, évapotranspiration... (Lahme and Bruse, 2003; Robitu, 2005). Cependant, ces modèles ouverts laissent entrevoir de grandes possibilités d'évolution.

Les effets directs et indirects sur la consommation énergétique des bâtiments ont également fait l'objet de nombreuses études, expérimentales et numériques. Leurs résultats montrent les effets bénéfiques de la plantation d'arbres le long des façades, avec des réductions des consommations allant jusqu'à 50% pour la climatisation (Akbari et al., 1997) et des gains plus faibles pour le chauffage (Huang et al., 1990; Simpson and McPherson, 1998). Les dispositifs architecturaux tels que les toitures et façades végétales ont également fait l'objet de recherches à la fois pour leur effet sur la consommation énergétique des bâtiments et pour leur effet sur le climat (Alexandri and Jones, 2008).

Notons cependant que l'évapotranspiration peut avoir des impacts négatifs : en effet un fort taux d'humidité entraîne des charges latentes supplémentaires à combattre pour les systèmes de traitement de l'air ; il peut également détériorer les conditions de confort intérieur.

Les effets de la végétation, dans l'environnement d'un bâtiment ou sur son enveloppe sont pris en compte dans les modèles par l'usage de subterfuges (modification du rayonnement solaire incident, définition de couches d'isolation) ou par le développement de modules complémentaires. Les modèles de thermique dynamiques des bâtiments ne contiennent pas encore de module directement intégré.

L'utilisation de la végétation bénéficie aussi à la qualité de l'air et à une moindre émission de gaz à effet de serre. Des scénarios ont été étudiés pour différentes villes. Par exemple, une extension de 10% du couvert végétal de New-York permettrait de diminuer le taux d'ozone au sol de 3% selon (Luley and Bond, 2002). La réduction de la demande énergétique des bâtiments entraîne *de facto* celle d'émission de GES.

Pendant sa croissance, une plante intercepte et stocke du carbone (contenu dans l'atmosphère). Lors de sa décomposition, ou de pertes de matière, le carbone est relâché dans l'atmosphère ou transféré au sol. Le bilan de ce cycle rend compte d'une quantité substantielle de carbone stockée dans la végétation et le sol. Cette quantité varie cependant en fonction du type de végétation (Nowak and Crane, 2002), et une politique de végétalisation doit rigoureusement comparer ce bilan aux émissions liées à la politique elle-même (production des plants, éventuel transport, entretien, fin de vie).

Les feuilles retiennent certains des polluants contenus dans l'air par des procédés mécaniques ou chimiques :

les particules, les NO_x, le SO₂, le CO et l'ozone. Cependant, les premières études sur ces effets ont montré un impact modeste en regard des critères de qualité de l'air (Nowak et al., 2002).

Ces effets sont par ailleurs à mettre en concurrence avec les émissions de COV générées par les plantes : les choix de végétation doivent être soigneusement opérés de manière à éviter des plantations contreproductives (Benjamin et al., 1996).

Par ailleurs, le rôle de la végétation sur l'interception de l'eau de pluie, et sur le bilan hydrique de façon plus générale, a été abordé dans plusieurs travaux de recherche portant sur l'hydrologie des espaces urbanisés. En effet, la gestion des eaux pluviales en milieu urbain fait de plus en plus appel à des techniques « alternatives » dont l'objectif est de stocker et d'infiltrer les eaux de ruissellement au lieu de les rejeter rapidement vers le milieu récepteur. Ces techniques sont souvent liées à l'introduction de la végétation en ville, à travers des dispositifs comme des bassins paysagers ou des noues enherbées. Les modèles hydrologiques récents dédiés au milieu urbain permettent de prendre en compte la végétation (Rodriguez et al., 2008; Xiao et al., 2000) et l'influence de dispositifs alternatifs végétalisés sur le bilan hydrique devient possible (Rodriguez et al., 2007; Xiao et al., 2007). Toutefois, les conditions microclimatiques y sont déterminées de façon très simplifiée et une vision plus intégrée des bilans hydriques et énergétiques serait plus appropriée pour une évaluation de l'introduction de ces dispositifs à l'échelle de l'agglomération.

Nous avons également relevé des études portant sur les propriétés ambiantales de la végétation : réduction des niveaux sonores, protection par rapport au vent, à l'ensoleillement, températures d'air plus faibles en été... Les diminutions des températures contribuent à une amélioration des conditions de confort (Gomez et al., 2004). (Robitu, 2005) a évalué dans une place ombragée une amélioration des indices de confort de un point PMV*, et une situation de confort ramenée en début d'après-midi d'été à des valeurs acceptables de l'indice PMV*. (Ali-Toudert and Mayer, 2007) observent, dans des rues-canyons ombragées une diminution de l'indice de confort PET (qui rend bien compte des effets radiatifs) de l'ordre de la vingtaine de degrés Celsius.

Ces approches abordent essentiellement l'entrée « physique » des ambiances. La notion de proxémie sensible (Balaï, 1985; Balaï et al., 2006) définit les liens inter culturels produits par les phénomènes sensibles de l'activité usagère dans l'espace construit. Le rôle du végétal dans la construction des dimensions proxémiques inter individuelles n'a jamais été étudié. Toutefois, il a été mis en évidence que les hommes ont un espace approprié qui, dans chaque société urbaine, se diversifie par la variété de l'organisation du végétal. Cette hypothèse déjà testée dans le domaine de l'ambiance sonore a permis de dégager cinq résultats qui préfigurent la mise en forme de nos attendus concernant le rôle du végétal dans la ville dense de demain.

1• L'évaluation quantitative et, particulièrement, métrologique d'un espace végétalisé ordinaire n'a de sens qu'en fonction d'autres données telles que : contraintes de construction, rapport avec l'environnement ambiant, facteurs dépendants de l'usage effectif ;

2• La solution technique de l'isolation visuelle n'est pas toujours et universellement la seule possibilité d'aménagement végétal de l'espace dense, et, plus encore, elle est liée à des postulats culturels particuliers qui privilégient l'instance individuelle et d'autres « étanchéités » sensibles ;

3• Le mode d'habiter crée une ambiance avec le végétal, de fait. Les différentes techniques de « végétalisation » du parc, de la place, de la façade, etc., modifient autant la qualité sensible de l'espace commun extérieur que celui de l'espace des pièces de l'habitat (réverbération, coloration spectrale, taches lumineuse, ombre...) ;

4• Selon la théorie proxémique, les membres d'une culture (la culture, c'est-à-dire la façon dont l'homme donne du sens au monde qui l'environne et se donne du sens en rapport avec les autres), s'ils veulent s'exprimer d'une manière prévisible et communicative, doivent "apprendre" à se conduire (donc à parler, à gesticuler, à se mouvoir dans l'espace) sur la base de comportements conventionnels aussi rigoureusement articulés que cachés. La culture d'une société consiste en ce que quelqu'un doit savoir ou croire pour pouvoir agir d'une façon acceptable envers ses membres, et le faire dans tout rôle social qu'il accepte pour lui-même. Dans ce cadre, comment les voisins « voisinent-ils » avec le végétal ? Le végétal est-il une aide aux relations de voisinage ? C'est surtout l'habitant qui gère ce type de rapport proxémique, qui se pose dans l'espace en fonction du végétal et de l'ambiance qu'il lui offre (odeurs, fraîcheurs, sonorités, masquages visuels...) dans le temps. L'ensemble de ces effets joue un rôle dans la symbolique du confort de l'habitat ;

5• La notion de confort fait souvent abstraction de l'extérieur, du contexte local, comme si la cellule/logement pouvait être conçue indépendamment de celui-ci et recéler un confort intrinsèque. Or, dans la pratique quotidienne, c'est souvent par rapport à l'environnement que se définit le confort. Le végétal est un donneur d'ambiance dans l'espace public comme en façade de bâtiment. Il est donc important de saisir dans quelle mesure il peut influencer les pratiques de confort et d'adaptation à l'intérieur du logement dans un contexte de densité humaine. Cet axe d'analyse vise donc à rétablir un équilibre théorique et pratique entre le logement, son environnement sensible et le végétal.

Ces travaux sur les impacts physiques et sensibles de la végétation sont à mettre en regard de travaux sur les impacts sociaux et économiques : par exemple, (Kuo and Sullivan, 2001) montrent qu'elle s'associe d'une réduction de la criminalité et (Laverne and Winson-Geideman, 2003) la relie à une augmentation de l'attractivité commerciale ou touristique qui entraîne celle de la valeur foncière. Les arbres, par l'ombrage qu'ils procurent, prolonge la durée de vie des revêtements de sol, entraînant ainsi une économie d'entretien (McPherson and Muchnick, 2005).

En conclusion, ces travaux mettent en évidence l'intérêt d'une approche systémique de la végétation urbaine, mais aussi la nécessité de développer des recherches qui prennent en compte les spécificités des villes. (Giridharan et al., 2008), par exemple, nous alertent sur le lien entre impacts de la végétation et la particularité du contexte : forme urbaine, climat, mode constructif des bâtiments. Il est nécessaire de développer des approches appliquées à nos climats, nos formes urbaines, d'obtenir des résultats quantifiés qui les prennent en compte. Il est également nécessaire de promouvoir des techniques pour lesquelles on aura à disposition une évaluation aussi globale que possible, prenant en considération non seulement des critères environnementaux, mais aussi des critères sociaux, économiques, et de conception des espaces urbains.

Il est nécessaire d'aller beaucoup plus loin dans les évaluations à grande échelle des politiques de végétalisation (ou de l'impact sur la place du végétal de politiques de densification), en prenant en compte d'une manière différenciée les types de dispositifs végétaux et en imaginant plusieurs évolutions temporelles de la ville.

C. BILAN D'ACTIVITE PAR VOLET

1. COORDINATION DU PROJET

Nous avons particularisé la tâche de coordination et de management du projet en la considérant comme un volet à part entière (Volet 0). Ce volet comprend les travaux habituels de la direction de projet coopératif :

- management du projet, notamment en terme de coopération entre les équipes,
- calendrier,
- organisation de la préparation et de la remise des livrables et rapports,
- organisation des réunions,
- suivi du budget,
- diffusion (en terme de représentation, manifestations...),
- articulation des travaux du projet avec Nantes Métropole, et le Service des Espaces Verts et Environnement de Nantes, partenaires extérieurs.

La coordinatrice du projet Marjorie Musy a été assistée par Noëlle Guyon, chargée de gestion de l'IRSTV, et de Véronique Dom, chargée de communication de l'IRSTV.

Un comité de coordination, constitué des responsables de chaque volet et des responsables de chaque équipe, s'est réuni environ tous les 6 mois.

ACCORD DE CONSORTIUM

Au second semestre 2010, les coordinateurs du projet ont établi l'accord de consortium qui les engageait. Cet accord, établit les règles et la gouvernance du projet. Un des points particulier est la mise en commun des abondements de l'ANR reçus par les différents partenaires afin de favoriser un projet de diffusion commun plus ambitieux et donc plus visible. L'accord de consortium a été signé par l'ensemble des partenaires en janvier 2011.

ASSEMBLEES GENERALES

Date	Lieu	Partenaires présents	Thème de la réunion
08-02-2010	Ensa Nantes	CSTB, LPGN, IFSTTAR, CNRM, INRA, IRSTV, LaSIE, IRSN, Plante&Cité, Seve Nantes, Nantes Métropole	Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte de l'Assemblée Générale de démarrage
20&21-02-2011	INRA de Bordeaux	CSTB, LPGN, IFSTTAR, CNRM, INRA, IRSTV, LaSIE, IRSN, Plante&Cité, Seve Nantes	Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte de l'Assemblée Générale n°2
19&20-01-2012	CSTB Nantes	CSTB, LPGN, IFSTTAR, CNRM, INRA, IRSTV, LEPTIAB, IRSN, Plante&Cité, ONERA, Seve Nantes, Nantes Métropole	Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte de l'Assemblée Générale n°3
12&13-11-2013	Ensa Nantes	CSTB, IFSTTAR, CNRM, INRA, IRSTV,	Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte de l'Assemblée Générale n°4

Date	Lieu	Partenaires présents	Thème de la réunion
		LaSIE, Plante&Cité, Nantes Métropole, ONERA (en visioconférence)	

COMITES DE COORDINATION

Date	Lieu	Partenaires présents	Thème de la réunion
11-06-2010	Ensa Nantes (visioconférence avec Bordeaux, Toulouse et La Rochelle)	CSTB, LPGN, LCPC, CNRM, ONERA, INRA, IRSTV, LEPTIAB	- Préparation du rapport d'activité - Bilan de la participation des équipes - Accord de Consortium - Bilan par Volet - Programmation de la 2ème AG Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte du Comité de Coordination n°1
19-02-2011	INRA de Bordeaux	CSTB, IFSTTAR (LCPC), CNRM, ONERA, INRA, IRSTV, LEPTIAB, IRSN, Plante&Cité	- Rôle de Mme Adèle Ferrazzini à L'ANR (présente à la réunion) - Bilan administratif de la coordination - Retour sur l'accord de consortium - rappel des éléments importants - Gestion des abondements (cycle de conférences, ouvrage de synthèse bibliographique) - Présentation de l'avancement de VegDUD à L'ANR le 8 février 2011 - Bilan par équipes des activités depuis le 11 juin - Bilan scientifique de la coordination - Report d'un an de la seconde campagne expérimentale - Mise en place d'une coordination de la partie télédétection du projet - Lien avec les autres projets - Organisation du CR à T+18 mois Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte du Comité de Coordination n°2
30-06-2011	Ensa Nantes (visioconférence avec Bordeaux, Toulouse et La Rochelle)	CSTB, IFSTTAR, CNRM, ONERA, INRA, IRSTV, LEPTIAB, IRSN, Plante&Cité	- Bilan de la période janvier-juillet 2011 par Volet et par équipe - Méthode de mise au point des scénarios - Organisation du Compte rendu à T0 +18 mois Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte du Comité de Coordination n°3
19-01-2012	CSTB et audioconférence avec Toulouse (CNRM et ONERA)	CSTB, IFSTTAR, CNRM, ONERA, INRA, IRSTV, LEPTIAB, IRSN	- Bilan de la période juillet 2011-janvier 2012 par Volet et par équipe Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte du Comité de Coordination n°4

Date	Lieu	Partenaires présents	Thème de la réunion
Plante&Cité			
4-10-2012	Audioconférence	IRSTV, IFSTTAR, LaSIE, Plante & Cité, ONERA, CNRM, EPHYSE, IRSN, CSTB	- Bilan de la période janvier 2012 2011-octobre 2012 par Volet et par équipe - Prévisions de valorisations 2013 Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte du Comité de Coordination n°5
16-04-2013	Audioconférence	IRSTV, IFSTTAR, LaSIE, Plante & Cité, ONERA, CNRM, EPHYSE, IRSN, CSTB	- Bilan des activités par équipe et par volet - Organisation de la rédaction du rapport final - Organisation des actions de valorisation (ouvrage, séminaires finaux, publications dans les revues) Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte du Comité de Coordination n°6
12-11-2013	Ensa Nantes	IRSTV, IFSTTAR, LaSIE, Plante & Cité, CNRM, EPHYSE	- Bilan des activités par équipe et par volet - Organisation de la rédaction du rapport final - Organisation du séminaire final Le compte rendu est donné en Annexe1 – Compte du Comité de Coordination n°7

DIFFUSION ET COMMUNICATION

Plusieurs actions de diffusion ont été engagées dès le début du projet. Elles concernent la communication quotidienne et événementielle vers l'extérieur et la communication au sein du projet.

Communication interne permanente

La communication au sein du projet est assurée avec la mise en place d'une plateforme extranet permettant de communiquer et de capitaliser l'information (Figure 1). Cet extranet est ouvert en lecture et écriture à tous les membres du projet. Compte-tenu des informations qu'il contient, il n'est pas ouvert à l'extérieur. Tous les comptes rendus, les documents présentés lors des réunions et les documents produits par les partenaires sont déposés sur le site. Il propose également un lien vers la base de données bibliographique partagée.



Figure 1 Page d'accueil de l'extranet VegDUD : <https://www.irstv.vegud.fr>

Communication externe « quotidienne »

La communication quotidienne vers l'extérieur repose sur une plaquette réalisée par l'IRSTV qui reprend la structuration du projet (donnée en ANNEXE 1 – Documents de communication) et la mise en place d'une information sur le projet sur le site de l'IRSTV et sur les sites des partenaires

IRSTV :

<http://www.irstv.fr/fr/recherche/contrats-de-recherche/acheves/40-vegud>

LaSIE :

<http://lasie.univ-larochelle.fr/VegDUD>

CNRM :

<http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article240>

IFSTTAR :

http://www.lae.ifsttar.fr/fileadmin/redaction/1_institut/1.20_sites_integres/AME/LAE/Documents/Fiches_projet/r%C3%A9sumés/VEGDUD.pdf

Cycle de conférences « Ville Verte, Ville Dense, pari durable ? »

Dans le cadre de l'utilisation des abondements ANR, en coordination avec les pôles de compétitivité Végépolys et PGCE et en partenariat avec Nantes Métropole, le Service des Espaces Verts en Environnement de la Ville de Nantes, la Société Publique Régionale des Pays de la Loire et l'ensa de Nantes, nous avons organisé au 1^{er} semestre 2011 un cycle de 6 conférences à l'ensa de Nantes.

Le programme de ce cycle de conférence a été établi en complémentarité avec les recherches abordées dans VegDUD de manière à donner aux partenaires un socle de connaissances commun. Il a été inscrit dans le programme pédagogique de l'ensaN et largement ouvert à l'extérieur, ouverture favorisée par une forte communication des partenaires vers leurs personnels et adhérents.

Les résumés des conférences ainsi que les documents graphiques sont donnés en [ANNEXE 1](#) - Documents de communication.

Le bilan de participation est le suivant :

- Raphaëlle Hondelatte : environ 150 personnes
- Nathalie Blanc : environ 120 personnes
- Serge Bonnefoy : environ 50 personnes
- Nathalie Mongé : environ 70 personnes

- Gaëlle Aggéri : environ 90 personnes
- Edouard François : environ 300 personnes

Les conférences ont été filmées et peuvent être visualisées sur le site de l'ensa de Nantes. Des DVD des captations ont été réalisés pour chaque partenaire du projet.

La communication autour de ce cycle de conférences a été l'occasion de communiquer sur VegDUD sur les médias locaux (article dans les pages locales de Ouest France le 24/03/2011, émission sur AlterNantes le 23/03/2011, site le courrier de l'architecte qui n'est plus disponible.

RESTITUTION DU TRAVAIL DES ETUDIANTS D'AGROCAMPUSeST

Dans le cadre de la valorisation du projet, nous avons fait le choix de travailler avec un groupe d'étudiants d'Agrocampus Ouest, en M2 Paysage Ingénierie des Territoires. Dans le cadre d'un projet appliqué sur 6 mois, le groupe avait pour mission de projeter les scénarios théoriques de VegDUD dans plusieurs quartiers nantais. Le travail, financé dans le cadre de l'abondement du pôle de compétitivité Végépolis a fait l'objet d'une restitution à laquelle le pôle a invité ses adhérents (cf. invitation en [annexe 1](#)) et d'un [catalogue des dispositifs](#).

VEGDUD DAY DANS WGIC

En 2013, le congrès international WGIC (Word Green Infrastructure Congress) s'est tenu à Nantes alors Capitale Verte Européenne. Marjorie Musy et Maeva Sabre ont participé au conseil scientifique de l'événement et ont mis en œuvre une journée de présentation des résultats de VegDUD en parallèle de la journée de formation proposée (programme et présentations en [annexe 1](#)). Le site de la journée est consultable sur <http://vegduwgc.sciencesconf.org/>

CONFERENCE FINALE

La conférence finale a été organisée le 12 décembre 2013. Comme une communication plus scientifique des travaux avait été réalisée lors de la journée dans WGIC, le choix a été fait ici d'avoir une restitution d'avantage tournée vers les opérationnels. La restitution a été organisée sur une journée et accueillie dans les locaux de Nantes Métropole.

120 personnes ont assisté à la journée (la capacité de la salle). Le programme, et les éléments de présentation sont donnés en [annexe 1](#). Le site de la journée est consultables sur : <http://vegdufinal.sciencesconf.org/>

AUTRES ACTIONS DE COMMUNICATION

Marjorie Musy a présenté le projet à quatre reprises :

- A l'occasion d'une participation aux « Journées d'études urbaines 2010: Vers une nouvelle alliance entre ville et nature » de l'Université de Lausanne ;
- Lors d'une conférence dans le cadre de l'exposition « Biodiversités » du CNRS au Trocadéro à Paris, le 30 octobre 2010 ;
- Lors de la conférence de Nathalie Mongé dans le cycle de conférences cité plus haut.
- Lors du RDV Climat de Nantes Métropole le 7 novembre 2007
- Lors de l'atelier POPSU à Berlin, « Des jardins dans les métropoles » <http://www.popsu.archi.fr/popsu-europe/themes/des-jardins-dans-les-metropoles>, le 1^{er} avril 2013. Ce cycle de séminaires a donné lieu à la publication d'un ouvrage (Bensalma et al., 2013).

Articles dans la presse spécialisée :

- Techni.Cités, n°96, 8 octobre 2010, p38.
- « Le mur végétal a-t-il un sens? Du microscopique au territoire, les défis et enjeux du végétal », Le Lien Horticole, 04/05/2011.
- Bozonnet, E., Djedjig, R., et Belarbi, R. « Apports de la végétalisation à l'échelle des bâtiments et des quartiers : Aspects thermiques ». *Jardins de France*, juin 2014. <http://www.jardinsdefrance.org/la-collection/629-murs-toitures-verdure/aspects-thermiques>.
- Sabre, Maeva, et G. Bulteau. « Végétaliser les toitures et terrasses ». Magazine Pour la Science, mai 2011.

L'ensemble des actions de communication est donné dans le formulaire de compte rendu final, les documents disponibles sont dans l'[Annexe1](#).

2. VOLET 1 : TYPO – TYPOLOGIE DU VEGETAL URBAIN (C. GUTLEBEN, PLANTE&CITE, AVEC M. MUSY,IRSTV/CERMA)

OBJECTIFS :

Il s'agissait de constituer les données nécessaires à la connaissance du végétal urbain, d'une manière générale et d'une manière appliquée au site de Nantes. Nous avons ainsi cherché à regrouper les éléments nécessaires pour projeter des scénarios d'évolution de la ville (évalués par la suite) et les documenter avec les caractéristiques des types végétaux. Nous aurons 4 objectifs secondaires :

1. recenser les pratiques du végétal urbain, communes et nouvelles ;
2. relever les atouts (relatifs aux enjeux étudiés) des pratiques mais aussi leurs inconvénients (entretien, émission COV...) et proposer les points à prendre en compte dans un bilan global ;
3. orienter les choix des dispositifs pour les scénarios ;
4. regrouper les données nécessaires aux évaluations : caractéristiques des dispositifs végétaux.

TYPO 1 – MISE EN PLACE D'UNE TYPOLOGIE DE LA VEGETATION URBAIN

Description initiale : La diversité de la végétation urbaine implique un travail de classification. Nous élaborerons une typologie de la végétation urbaine à partir d'une synthèse bibliographique et d'enquêtes, notamment auprès des gestionnaires d'espaces verts. Celle-ci prendra en compte l'évolution de la pratique végétale urbaine au cours du temps : proportions, apparitions et disparitions de types, liens avec l'évolution de la forme urbaine ou avec des mouvements urbains ou environnementaux.

La typologie se déclinera sur l'ensemble des thématiques abordées dans le projet : elle contiendra des informations liées à l'hydrologie, l'énergétique, la climatologie, les ambiances... Le SEVE de Nantes participant à cette recherche en partageant ses bases de données et son SIG, un travail d'inventaire permettra de classer les zones d'espaces verts de la ville de Nantes suivant différents types liés aux problématiques abordées. Ces informations seront complétées avec les analyses complémentaires menées dans TYPO 4 et les résultats obtenus dans les tâches d'évaluation (EvalPRIV et EvalCOLL).

Il s'agit de mettre œuvre une caractérisation du végétal qui doit répondre aux questions posées lors de l'évaluation : description des formes des éléments végétaux, de leurs caractéristiques physiologiques, etc.

Une des difficultés à surmonter est l'imbrication de deux échelles : celle des compositions végétales (parcs, espaces verts de grands ensembles, jardins, coulées vertes...) et celle de l'entité végétale (l'arbre, le bosquet, le carré de pelouse). En lien avec les travaux menés dans PHYSIO, il faudra trouver des méthodes pour passer de l'une à l'autre selon les besoins des évaluations.

Après ce travail de structuration, le travail de classification sera réparti en deux sous-volets : la végétation urbaine collective (parcs, éléments de voiries, aménagements, etc.), et la végétation urbaine privée (jardins, toitures végétales, façades, séparations, etc.), qui correspondent à deux domaines différents d'usages et de relations, à deux domaines de conception et de prise de décision.

Travail réalisé : Ce travail a été coordonné par Plante et Cité et a fait l'objet d'un mémoire d'études d'ingénieur pendant 6 mois. Le travail a consisté dans un premier temps à identifier les typologies de la végétation urbaine existantes. Trois principaux types ont pu être recensés :

- Typologies foncières et juridiques ;
- Typologies « de gestion » ;
- Typologies paysagères, d'usages et de fonctions.

Aucune d'entre elles ne constitue une typologie fonctionnelle de la végétation urbaine permettant de faire le lien avec des fonctions écosystémiques de la végétation concernées par VegDUD. Un travail spécifique a ainsi été conduit pour mettre en place une typologie propre au contexte et aux besoins de VegDUD à savoir :

- Décrire la végétation par rapport à des caractéristiques influençant ses impacts écosystémiques et faire émerger des types de végétation ;
- Hiérarchiser ces types de végétation par rapport à leurs fonctions écosystémiques potentielles ;
- Mettre en évidence des configurations végétales remarquables, c'est-à-dire des types de végétation ayant un impact favorable pour toutes ou plusieurs fonctions écosystémiques.

Le travail a consisté à :

- Mettre en évidence l'ensemble des caractéristiques fonctionnelles de la végétation urbaine par des recherches bibliographiques ;
- Traduire certaines caractéristiques fonctionnelles en critères de description concrète de la végétation ;
- Hiérarchiser les types de végétation pour mettre en évidence les plus significatifs.

La typologie a également pris en compte la nécessité de décrire la superposition de différents types de végétation et à l'intérieur de strates.

En [ANNEXE 2](#) (TYPO1), est présentée la structure de la typologie, base du livrable 1.7.

Nous avons proposé de produire, une base de données bibliographique associée à la typologie. Cette base de données bibliographique a été construite dans l'environnement zotéro qui permet de travailler de manière collaborative. Elle est structurée sur la base de volets et sous-volets du projet. Cette structuration est motivée par des aspects pratiques, en effet, chaque chercheur associé au projet sait à quelle partie il collabore et peut facilement aller chercher l'information regroupée sur d'autres thématiques. La base de données bibliographique compte à l'heure actuelle plus de mille quatre cent références.

TYPO 2 – LA VEGETATION URBAINE COLLECTIVE : PARCS, COULEES VERTES, CONTINUITES, AMENAGEMENTS, ELEMENTS DE CIRCULATION, ALIGNEMENTS D'ARBRES, VEGETATION DIFFUSE, CONTROLEE OU NON...

Description initiale : Trois approches complémentaires seront menées. La première consiste en une classification fonctionnelle et paysagère des espaces verts urbains. La seconde propose une étude de l'évolution d'un type d'espace vert urbain, celui entourant les grands ensembles qui, à l'heure de la densification des villes, représente un enjeu majeur. La troisième, centrée sur les ambiances, vise à faire émerger des configurations sensibles remarquables offertes par le végétal.

Classification fonctionnelle et paysagère

Pour les concepteurs et gestionnaires d'espaces verts, les choix d'aménagements, de compositions d'espèces végétales et de mode de gestion nécessitent de disposer de connaissances quantitatives de leurs impacts sur l'écologie urbaine, de gérer les flux et la biodiversité et de préserver les écosystèmes les plus sensibles. A partir de la bibliographie, d'enquêtes et de relevés de terrain, nous réaliserons une typologie de la nature des espaces verts et des scènes végétales du domaine collectif, en fonction de leurs caractéristiques fonctionnelles (rôle architectural et paysager), de leur rôle d'ingénierie ou encore d'écologie. Les recherches porteront sur deux référentiels : le végétal dans ses caractéristiques agronomiques et physiologiques et les configurations d'espaces verts au sens large, aménagés et naturels, dans leurs caractéristiques éco-systémiques. Différentes caractéristiques et groupes fonctionnels seront étudiés :

1. La taille et la composition végétale d'espaces verts aménagés et d'espaces interstitiels intervenant dans les schémas des trames vertes ou de corridors écologiques à l'échelle d'une collectivité territoriale ;
2. La structure et la configuration de scènes végétales ayant une fonction de rétention des eaux pluviales (noues, bassins de rétention...) ;
3. Les compositions végétales permettant d'optimiser les fonctions écologiques de maintien et d'augmentation de la biodiversité spécifique en milieu urbanisé.

Les inventaires typologiques permettront d'identifier des références qualitatives et quantitatives sur les caractéristiques des formes de végétation urbaine collective.

Espaces verts des grands ensembles

Nous nous intéresserons aux zones de végétalisation initiées par des volontés politiques fortes et des maîtres d'œuvres engagés d'un point de vue doctrinal dans la défense de la qualité de l'espace public, notamment les grands ensembles qui intègrent cette question dès la programmation et le

projet dans sa phase initiale. Une analyse rétrospective permettra de tracer les lignes principales d'une généalogie végétale qui prend ses racines dans les premières cités-jardins expérimentées durant la seconde moitié du 19^e siècle jusqu'aux développements urbains des zones périphériques, voire des villes nouvelles. L'étude des grands ensembles sera centrale avec une évaluation des politiques actuelles de rénovation urbaine dans le cadre de l'ANRU et du potentiel de conservation ou de reconversion de ces espaces verts hérités. L'analyse fera également le point sur la pérennité de ces zones végétalisées en termes d'entretien et d'appropriation par les habitants.

Recherche de configurations végétales remarquables du point de vue des ambiances

Le développement « esthétique » et équitable du végétal dans la ville de demain peut être pensé à partir des expériences sensibles d'aujourd'hui, depuis plusieurs situations perceptives. Nous partirons à la recherche de ces configurations végétales locales (au croisement des configurations spatiales, sensibles et sociales) les plus remarquables. Comment, à partir des formes d'ambiances données par le végétal et saisies à un moment donné (conditions météorologiques, temporalité saisonnières, offrandes visuelles, sonores, thermiques et olfactives...), la dimension esthétique émerge-t-elle dans le vécu ? Quelles en sont les orientations pour des conditions sociétales équitables dans cette ville ? Comment ce potentiel esthétique, qu'il s'agira de formaliser, peut-il rencontrer et stimuler les propositions esthétiques, et pas seulement techniques, de l'expert qui construira la ville de demain ?

Travail réalisé : Dans cette partie du volet TYPO, les trois recherches prévues ont été réalisées : La classification fonctionnelle et paysagère et la recherche de configurations végétales remarquables du point de vue des ambiances.

La classification fonctionnelle et paysagère a été réalisée par Plante et Cité qui a recruté un ingénieur pendant 6 mois. La production est une synthèse bibliographique des fonctions écosystémiques de la végétation en ville concernant :

- La qualité de l'air (GES, particules polluantes...);
- Empreinte carbone (facteurs de séquestration, d'émission...) ;
- Climat urbain (facteurs îlots de chaleur urbain...) ;
- La consommation énergétique des bâtiments ;
- Hydrologie et qualité de l'eau (ruissellement, qualité eaux pluviales, qualité eaux usées...) ;
- Dépollution des sols (phytoextraction, phytostabilisation, phytoremédiation...) ;
- Ecologie : habitats et corridors ;
- Qualité des ambiances (environnements sonores et lumineux).

Ce travail a fait l'objet d'un rapport (cf. [ANNEXE 2](#) (TYPO2)).

Le second travail concernait les **espaces verts des grands ensembles** et a fait l'objet d'un post-doctorat (Bensalma, 2013). Du point de vue méthodologique, il a consisté en une analyse de plusieurs grands ensembles avant et après réhabilitation, accompagnée d'enquêtes auprès des concepteurs et des habitants.

Ces enquêtes ont permis de rendre compte de l'importance accordée par les habitants à la végétation dans le cas des grands ensembles et son rôle psychosociologique. Les espaces verts, paysagés, aménagés en aires de repos, par exemple, symbolisent le calme, la relaxation et sont considérés comme une échappatoire aux dégradations sociales et architecturales que connaissent certains de ces ensembles à Nantes. La présence d'espaces verts de qualité, favorise l'ouverture de ces quartiers (dits sensibles) à des usagers extérieurs et participe ainsi à leur désenclavement social. C'est pourquoi, il est important de considérer les espaces verts de ces ensembles comme des connexions avec d'autres espaces naturels de la ville, en mettant en avant des concepts de parcours, promenades et cheminements.

Alors que la grille Dupont initiée en 1958 avait permis une normalisation assez précise des espaces plantés par secteur urbain (ou activité urbaine), aujourd'hui les normes sont plus globales : les recommandations les plus récentes (8 février 1973) préconisent 10m² par habitant au centre ville et 25m² en périphérie. Pourtant, l'apport en termes de qualité de vie peut être très différent selon la typologie d'habitat. Les cas étudiés à Nantes montrent que l'attente des habitants en termes d'espaces verts se rapporte le plus souvent au quartier lui-même. Pour eux, la végétation doit contenir et être contenue dans le grand ensemble, afin qu'ils puissent en profiter depuis leurs logements. Il serait donc plus judicieux de définir des normes de surface par grand ensemble.

Globalement, la perception des espaces verts est positive dans les grands ensembles étudiés même si elle varie suivant certains paramètres:

- La proximité du quartier des coulées vertes et bleues ;

- L'entretien;
- La diversité des équipements de loisirs et leur qualité;
- L'accessibilité visuelle et physique des espaces ;
- La répartition des espaces de loisirs dans le quartier ;
- L'aménagement et la configuration de l'espace de loisir ;

L'importance des critères de confort microclimatique et sonore varie suivant le type d'activité, entre un espace de détente et une aire de jeux pour enfants.

Le rapport entre la dimension sociale de ces quartiers et leur cadre naturel est omniprésent du fait que de nombreux habitants sont des retraités, sans-emplois ou habitants seuls. La dimension culturelle influence également la pratique des espaces de repos où, par exemple, le critère de vis-à-vis (d'intimité) est souvent relevé chez les habitants comme contraignant dans l'usage de certains espaces.

La présence de la végétation dans les espaces publics est très appréciée par les habitants, elle permet d'agrémenter le paysage urbain d'un point de vue esthétique et ressenti. Les habitants qui possèdent des façades sur des espaces verts s'estiment chanceux et avantagés par rapport à d'autres qui donnent sur des parkings et des aires de jeux.

L'analyse des rénovations de grands ensembles à Nantes et dans d'autres villes françaises montre trois types de prise en compte de la végétation :

- Le végétal comme élément de composition urbaine : la résidentialisation des pieds d'immeubles (délimitation entre espace public, semi-privé et privé) ;
- Le végétal créateur d'ambiances : il permet d'assurer une protection solaire au niveau des espaces publics et l'agrément du cadre de point de vue ressenti et visuel ;
- Le végétal comme composante d'une biodiversité, considéré dans un écosystème favorisant la présence et le développement de milieux écologiques riches.

Même si la perception globale des rénovations dans les grands ensembles nantais est positive, certains habitants remettent en cause la réduction de la surface végétalisée dans leur quartier. Cette perception peut toutefois être atténuée si les surfaces sont remplacées par des espaces verts de loisirs de qualité et bien équipés. En analysant les demandes et témoignages des habitants, des orientations d'aménagement ressortent comme essentielles :

- Proposer des espaces de loisirs végétalisés de qualité ;
- Assurer des promenades vertes permettant de sortir du quartier ;
- Diversifier les dispositifs végétaux dans le quartier, entre jardin, façade et toiture.
- Mettre en place un aménagement urbain adapté aux attentes des habitants ;
- Assurer un entretien régulier des espaces de loisirs.

Actuellement, l'approche du végétal dans les grands ensembles nantais s'oriente davantage vers une gestion écologique de biodiversité, l'aspect climat-énergie est très peu cité comme critère de décision.

Le détail des travaux est donné dans le [rapport de post-doctorat](#).

Recherche de configurations végétales remarquables du point de vue des ambiances

Ce travail a été coordonné par l'IRSTV et réalisé par CASA en sous-traitance. Il a donné lieu à un rapport livré en janvier 2011 ([Balaÿ O. et al., 2010 « Les dimensions proxémiques et le végétal dans la ville dense et de demain » Rapport d'étape 1, 47p.](#)) et à une restitution lors de l'AG du 20 janvier 2011. Ce travail, qui a été suivi d'une analyse d'espaces choisis, a permis de dégager une typologie d'espaces urbains intéressants du point de vue des ambiances données par le végétal. Ils ont été classés en trois catégories d'ambiance donneuses de sens :

- La première accueille une ambiance de voisinage vivante et plutôt anonyme. Elle permet de marcher sur un sol généreux en surface qui rend possible des pratiques collectives diversifiées. Ici le végétal et son sol assurent une ambiance de vie au dehors dans un environnement plutôt agréable. Toutes les formes d'appropriation semblent possibles : promenade, arrêts à l'ombre, jeux avec l'eau, sports, pique-niques...
- La seconde catégorie de configurations spatio-végétales dont on tentera la description offre une ambiance plus vivace, plus expressive, comme si le voisinage marquait le territoire. Les ambiances d'habitat reflètent la rencontre et l'installation dehors en petits groupes. Ici il semble que la population a « pris » le sol et le végétal.

Elle construit ou plutôt poursuit, dehors, à proximité des logements, un milieu de vie et des actions qui rassemblent.

3/ La troisième catégorie sélectionne des configurations spatio-végétales plus sensibles, c'est-à-dire immédiatement identifiables par les sens quelque soit la densité humaine, comme par exemple celles qui offrent immédiatement le sentiment d'un ressourcement ou d'un échappement à la ville dense. Elles peuvent être parfois fragiles au regard des conditions de voisinage. Ce sont par exemple des cours d'immeuble.

TYPO 3 – LA VEGETATION URBAINE PRIVEE

Description initiale : Nous étudierons ici la végétation urbaine privée au sol, (jardins clos, jardins ouverts, jardins familiaux), mais aussi la végétation intégrée dans l'architecture : patios, jardins suspendus, terrasses, toitures et façades végétales... A partir de la bibliographie et d'enquêtes, nous documenterons ces pratiques tant par rapport à leurs impacts physiques que sensibles.

Enveloppes végétales des bâtiments

La végétation en façade a un impact sur les ambiances dans les bâtiments : isolation par rapport au vent et au rayonnement solaire, filtration de la lumière et du son, humidification de l'air... Comment cet impact, qui dépend du type de façade, des espèces utilisées, des modes de culture, sont-ils perçus par les occupants des locaux ? La perception est-elle différente selon l'usage tertiaire ou résidentiel du bâtiment, selon son intégration urbaine (densité du site, exposition au bruit à la pollution)... ? Ces façades ont également un effet sur l'environnement urbain : modification des conditions microclimatiques, du son, de la lumière... Sont-elles perçues par les usagers de l'environnement urbain ? La conception d'ambiances urbaines ou architecturales basée sur l'utilisation du végétal pose des questions de durabilité, quels sont les facteurs de risque d'une telle stratégie ? Quelle expérience peut-on tirer des réalisations antérieures ?

La demande de plus en plus forte de toitures végétalisées s'accompagne de recherches-développement en terme d'éco-innovations qui portent sur les caractéristiques physiologiques des espèces végétales utilisées et sur leur diversification en lien avec l'épaisseur du substrat. Nous synthétiserons ces recherches dans le cadre d'un inventaire typologique des toitures végétalisées. Cette typologie cherchera ainsi à identifier les gammes végétales dont l'utilisation optimiserait des fonctions d'épuration de l'air ou de régulation thermique des bâtiments.

Jardins

Établir une typologie exhaustive des jardins urbains est une tâche à laquelle nous ne prétendons pas donner de réponse dans VegDUD. Notre approche sera orientée par notre objectif d'établissement de scénarios. Nous envisagerons trois modes d'investigation des jardins urbains :

- Le premier, appliqué à l'habitat individuel, consistera en l'étude des règles portant sur le végétal dans des règlements de lotissements de l'agglomération de Nantes, afin de mettre en évidence des constantes de ces règlements et éventuellement des évolutions reflétant des thématiques du développement durable, ou au contraire en contradiction
- Le second explorera les éco-quartiers français et s'intéressera plus particulièrement à la place et à la fonction des jardins dans ces quartiers.
- Enfin, le troisième mode d'investigation tentera une étude prospective à travers les petites annonces (Siret, 2006) afin de faire émerger les qualités principales que les habitants recherchent ou attribuent à leurs jardins.

Travail réalisé : les travaux sur les enveloppes végétales et les jardins ont été réalisés lors de stages d'architectes, par Hector Colonelli et Sabine Lepère.

Enveloppes végétales des bâtiments :

Le travail de stage d'Hector Colonelli (Colonelli, 2011) a montré que les murs végétaux apportent de la verdure où il n'est pas possible d'implanter de la végétation. Ils donnent un rôle, un usage aux murs, sans usage dans la ville. Ce rôle améliore la perception de l'espace urbain et des murs où ils sont placés, qui correspondent souvent à des murs protégeant des « habitants ». Ainsi, ces éléments construits acquièrent les caractéristiques et fonctions de la végétation.

La proximité et relation avec d'autres éléments verts, donc faire partie d'une trame verte, permet aux murs végétaux d'être plus perçus comme donneurs de fonctions végétales. Leurs caractéristiques sensibles : odeur, fraîcheur, etc., sont mieux perçues.

Les murs acquièrent un rôle différent selon le type et les caractéristiques sociales et spatiales d'espace urbain où ils sont placés. Ainsi, dans les quartiers d'habitation, où le lien entre les habitants et le sens communautaire est plus fort que dans d'autres types de quartiers, le rôle social du mur est prépondérant et même il peut devenir un élément d'intégration de la vie du quartier.

Dans des quartiers d'activités mixtes et plus centraux, plus minéralisés, le mur joue un rôle d'épurer de l'espace, d'amélioration de l'ambiance. Dans d'autres espaces, comme les infrastructures (avec une échelle plus grande, ou dans des espaces où il n'a pas une vie de quartier), le rôle d'amélioration sera surtout lié aux aspects de visuels, comme la beauté ou l'aspect symbolique de la végétation et pas aux aspects sensibles, car l'échelle de l'espace et la distance au dispositif ne permet pas de percevoir ces aspects.

A partir de cela, nous pouvons montrer que l'échelle de l'espace urbain joue un rôle fondamental dans la perception des murs végétaux, car la distance de visibilité du mur définit ses fonctions.

Ainsi, la conception des murs végétaux devrait s'accorder avec les caractéristiques de l'espace urbain (caractère, activités, échelle, distances, minéralisation, forme, etc.).

Nous avons également relevé que quel que soit l'état d'entretien du mur, celui-ci est toujours considéré par les citoyens comme une amélioration du cadre de vie (Cf. [ANNEXE 2](#), TYPO 3)

Jardins : Nous nous sommes intéressés à la place des jardins dans les nouvelles formes urbaines. Ce travail a fait l'objet d'un mémoire de recherche d'une étudiante en M2 d'Architecture. Ce travail de recherche ciblait les groupements de logements offrant des qualités de densité, avec jardin privatif en prolongement direct du logement, un ou plusieurs espaces extérieurs collectifs partagés. Ils sont indifféremment dénommés « individuel groupé », « collectif individualisé », « habitat intermédiaire », « logement hybride », « habitat individuel dense », etc. En effet, il est attendu de ces logements urbains qu'ils « détournent » les citoyens du rêve de la maison individuelle, principale cause de l'étalement urbain.

Une première partie de recherche a consisté en une investigation bibliographique sur les thèmes de l'attrait pour la maison individuelle et son jardin, et des problématiques de l'étalement urbain. Nous y avons défini l'ampleur de l'attraction des Français pour la maison individuelle ainsi que ses caractéristiques symboliques et sociales; nous avons identifié les phénomènes sensibles et d'usage attribués plus particulièrement au jardin et avons énoncé les critiques généralement faites par les habitants aux logements collectifs. Nous avons décrit les origines du phénomène d'étalement urbain et ses conséquences au regard des enjeux du développement durable et avons défini le concept de densité. Nous avons présenté deux réflexions et expérimentations de logements collectifs intégrant des espaces extérieurs et avons exprimé le regain d'intérêt pour ce type de logements.

Une investigation de terrain a ensuite été conduite auprès des habitants d'une opération dense intégrant des jardins privatifs (eco-quartier Bottière Chénaie à Nantes), dont le but était d'apporter des éléments de réponse aux deux hypothèses suivantes :

- Un logement collectif avec jardin privé offre une qualité de vie comparable à une maison individuelle;
- La force d'attractivité du jardin peut permettre d'accompagner une évolution des pratiques sociales habitantes en aidant au passage de la maison individuelle au logement collectif.

L'analyse des discours des habitants nous a permis, par analogie au jardin de la maison individuelle, de dégager les potentiels sensibles, sociaux et d'usage de ces jardins privatifs. Nos conclusions attestent que ces derniers offrent un bien-être sensiblement identique à ceux de la maison individuelle.

Si l'enquête nous a permis de valider la première hypothèse, elle ne couvre que de manière incomplète l'étendue des champs convoqués dans la seconde. En effet, le jardin n'est pas l'unique facteur d'attractivité pour ce type de logements et il ne permettra pas, à lui seul, de modifier les pratiques résidentielles.

La question « Comment accompagner une évolution des pratiques sociales habitantes ? » s'imposait donc comme un point de départ pour des recherches complémentaires visant l'approfondissement de la réflexion menée.

Ce travail complémentaire a été l'objet d'un second travail de recherche réalisé par la même étudiante (Lepère, 2011). Sa démarche de recherche s'est attachée à mettre en évidence le lien entre un agencement d'espaces extérieurs conçus et construits, et l'état de la sociabilité résidentielle, dans des opérations de logements denses. La méthodologie a consisté à étudier le rapport entre l'interaction entre les espaces extérieurs du logement intermédiaire d'une part, et la sociabilité résidentielle d'autre part. Trois terrains d'études nantais ont été choisis. Dans un premier temps, elle a mis en évidence l'interaction entre les espaces extérieurs, par l'établissement de fiches techniques pour chaque opération étudiée. Ces fiches techniques décrivent les dispositions spatiales offertes par les concepteurs aux habitants, et relèvent les dispositifs habitants de fabrication de l'intimité observés sur les terrains d'étude. Dans un deuxième temps, une analyse croisée met en relation les trois opérations étudiées et tente de dévoiler certains éléments rendant compte de l'état de la sociabilité résidentielle. (Cf. [ANNEXE 2](#), TYPO 3).

TYP0 4 – CARACTERISATION DES MATERIAUX

Description initiale : L'évaluation de dispositifs végétaux, dans un contexte urbain, par rapport à des fonctions climatiques, hydriques et d'ambiance nécessite une documentation fine des caractéristiques des matériaux. Nous utiliserons les techniques de télédétection hyperspectrale à petite échelle afin de documenter les caractéristiques optiques de surfaces végétales.

Ces techniques nous permettront d'identifier des signatures à haute résolution spectrale de végétaux, sols et bâtiments. La partie visible à proche infrarouge [0,4 ; 1,0 μm] permet de caractériser les cortèges de pigments de la végétation, l'état physiologique des feuilles et l'état d'oxydation des surfaces minérales. La gamme du spectre de 1,0 à 2,5 μm donne accès à l'état hydrique des feuilles et à la composition en minéraux d'altération ou en matériaux synthétiques. Au delà, jusqu'à 18 μm , l'identification des matériaux se complète par l'extraction de paramètres thermiques. La plupart des matériaux présentent des propriétés de réflexion simples de la lumière solaire (diffusion en surface), mais la végétation se caractérise par des effets directionnels très importants liés à des diffusions dans la masse végétale. De l'échelle d'une feuille à celle d'un arbre, il convient donc de prendre en compte la géométrie du port d'un feuillage et son insertion dans une scène urbaine. Les mesures au banc de laboratoire seront ainsi complétées par des mesures *in situ* en respectant dans chaque cas les géométries d'exposition des différents matériaux analysés.

L'ONERA de Toulouse caractérisera en laboratoire les propriétés optiques spectrales de 0,4 à 18 μm (du visible au thermique) des éléments constitutifs de la végétation macroscopique (plantes et arbres) en faisant varier leur stress hydrique. Le passage à l'échelle de l'arbre entier reposera sur l'utilisation d'outils de modélisation de la végétation.

Le LPGNantes caractérisera les propriétés optiques spectrales de 0,4 à 2,5 μm , en visible et infrarouge de réflexion solaire avec la constitution de véritables images hyperspectrales de laboratoire et de terrain de la végétation micro- à macro-scopique, du lichen ou de la micro-algue des supports humides aux massifs de plantes et aux arbres.

Ces contributions seront regroupées afin de mettre en place une base de données de propriétés optiques spectrales. Du fait des différences des moyens de mesure, les propriétés optiques obtenues seront différentes, essentiellement par la prise en compte des effets directionnels. Ces données, utiles pour les modèles permettront en outre l'identification des ensembles végétaux à partir des images de télédétection du visible au proche infrarouge acquises dans le volet EXPE et d'aboutir à une cartographie des matériaux (volet PHYSIO). Elles permettront également de mieux estimer les températures de surface des éléments de la scène urbaine (volet EXPE 3).

Travail réalisé : Le sous-volet TYP0 4 a été redéfini. En effet, il s'avère que pour la télédétection hyperspectrale, les mesures d'échantillons doivent être réalisées *in situ*. L'équipe de l'ONERA a donc réorienté donc sa contribution vers la caractérisation optique des façades végétales, en vue de fournir aux modélisateurs des valeurs d'émissivité et de réflectivité.

Ce travail a fait l'objet d'un rapport et les valeurs obtenues ont ensuite été utilisées dans les simulations des toitures et façades végétales. Toutes les valeurs obtenues sont détaillées dans le [rapport élaboré par l'ONERA \(Doya et al., 2012\)](#).

TYP0 5 – LA VEGETATION DES SCENARIOS ALTERNATIFS

Description initiale : Ce sous-volet a pour objet de proposer et argumenter les types de végétation dont il est intéressant d'évaluer des projections d'évolution dans les scénarios alternatifs. Nous exploiterons les caractéristiques des dispositifs végétaux qui auront été relevées dans l'approche typologique. Ceci permettra de poser les hypothèses à vérifier dans les évaluations.

Les propositions de scénarios seront basées sur l'observation des pratiques actuelles, sur la projection des effets de la réglementation urbaine (PLU) ou sur des hypothèses de promotion de dispositifs sur les bâtiments et dans les aménagements urbains (murs végétaux, toitures, noues...).

Ces propositions seront articulées avec les scénarios d'évolution de la forme urbaine (Volet PHYSIO 3) afin de prendre en compte les interactions : une promotion de végétation au sol s'accompagnerait par exemple d'une plus grande hauteur des bâtiments, une plus grande emprise au sol des bâtiments serait compensée, pour des questions d'infiltration de l'eau, par plus de toitures végétales, etc.

En point de départ de ce travail, coordonné par Plante et Cité, les questions posées ont été :

- Quelles sont les formes de végétation actuelles et quelles pourraient être leurs évolutions ?

- La densification des villes et les préoccupations de développement durable vont-elles faire apparaître de nouvelles formes de végétation ?

Différents points de vue ont été confrontés : celui des citoyens, des urbanistes, des paysagistes et des gestionnaires des espaces verts des villes. Une approche historique succincte a permis de retracer les évolutions de chaque point de vue jusqu'aux pratiques actuelles et de mettre en évidence les fondements ou les mécanismes à l'origine de ces évolutions. A partir de ces fondements, des perspectives d'apparition, de disparition ou de maintien de certaines formes de végétation ont été questionnées. Ce travail de concertation et d'enquête fait l'objet d'une synthèse spécifique « Evolution des formes de la végétation en ville : approche historique et perspectives ».

Ont ensuite été retenus les dispositifs végétaux qui ont paru les plus pertinents au regard des tendances actuelles concernant l'évolution de la végétation urbaine. Ce travail a donné lieu à un cahier des charges des dispositifs végétaux pouvant composer les scénarios alternatifs de végétation. Les dispositifs ont été soumis au coordinateur du volet MODE qui s'est prononcé sur la possibilité de projeter ces dispositifs dans les scénarios compte tenu des possibilités et des limites des modèles développés. La discussion a alors été engagée avec l'ensemble des participants au projet en assemblée générale.

Cinq dispositifs ont été sélectionnés :

- La végétation enveloppant les bâtiments : toitures et façades végétalisées ;
- Les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal ;
- Les couverts enherbés vs surfaces sans couvert végétal ;
- La végétation de pleine terre vs hors-sol ;
- Les arbres.

L'étude de ces dispositifs se fera par la variation de deux familles de paramètres :

- Les modes de gestion du couvert végétal (gestion extensive, intensive, superposition de strates...)
- Les paramètres morphologiques (relation forme urbaine / forme végétale, taille et répartition des espaces verts)

Un tableau a été soumis aux équipes impliquées dans les volets MODE, EvalCOLL et EvalPRIV qui ont croisé dispositifs et fonctions à étudier.

L'ensemble de ce travail fait l'objet d'une synthèse donnée en [ANNEXE 2](#) – TYPO 5 (Anquetil, 2011a, 2011b).

RESULTATS :

- La recherche a dégagé 5 familles de dispositifs qui devaient faire l'objet d'évaluation en raison des enjeux urbains et environnementaux qu'ils portaient : les toitures et façades végétales ; les surfaces enherbées (opposées aux surfaces minérales) ; les systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal ; les arbres ; les plantations hors sol (opposée à celles de pleine terre).
- Des caractéristiques optiques de façades et toitures végétales ont été évaluées expérimentalement.
- Une base de données bibliographique conséquente a été mise en place et une synthèse bibliographique sur les impacts des dispositifs étudiés a été rédigée.

L'ensemble des documents disponibles est donné en [ANNEXE 2](#) .

3. VOLET 2 : PHYSIO – PHYSIOGRAPHIE URBAINE : DOCUMENTATION ET REPRESENTATION DU VEGETAL URBAIN (N. LONG, IRSTV/LIENSS)

OBJECTIFS :

L'objectif principal de ce volet était de fournir une physiographie urbaine de la ville de Nantes à l'instant t et de proposer des physiographies alternatives (scénarios) en fonction de contraintes. Dans ces physiographies, il s'agissait d'explicitier au mieux la place occupée par la végétation en lien avec l'espace bâti, de définir ses caractéristiques et sa représentation spatiale.

Trois sous-volets ont été développés, qui correspondent aux objectifs suivants :

- Mettre en place un SIG environnemental collectif pour définir, qualifier et représenter la physiographie urbaine de Nantes ;
- Développer une méthodologie pour caractériser les espaces verts à partir des données de télédétection (domaines visible, hyperspectral, infrarouge thermique);
- Définir des physiographies alternatives à partir de scénarios possibles d'évolution de la ville (densification, étalement, ...) et des résultats des tâches EvalPRIV, EvalCOLL et TYPO.

Ils sont étroitement liés, notamment pour l'utilisation et la prescription des outils développés (base de données, routines d'analyses spatiales temporelles dans OrbisGIS).

PHYSIO 1 – SIG ENVIRONNEMENTAL COLLABORATIF

Description initiale : Du fait de leurs capacités d'abstraction, de représentation et d'analyses spatiales, atouts incontestables pour offrir une vision systémique d'un territoire et de ses transformations, les Systèmes d'Information Géographique et plus largement l'information géographique sont devenus incontournables dans les démarches de diagnostic et de planification urbaine.

L'identification et l'étude de la végétation en milieu urbain nécessite de disposer de données variées multi-échelles et multi-temporelles qui permettent de couvrir le large spectre de la végétation, telles que Données d'observation de la terre (DOT), Bases de données urbaines (BDU), et référentiels numériques nationaux (Référentiel à Grande Échelle, RGE). Intégrées dans le SIG, ces données sont agrégées, désagrégées, croisées pour fournir des cartographies d'état, d'évolution, de tendances ou des indicateurs.

Ces dernières années, de nombreux efforts ont permis de définir de nouveaux standards pour partager l'information géographique et la rendre accessible dans les SIG. Cependant, de nombreux blocages persistent lorsqu'il s'agit de représenter et de traiter des sources multiples, notamment dans un contexte pluridisciplinaire où la ville se décrit et se lit différemment dans chaque discipline.

Nous proposons de construire une ontologie de l'espace urbain. À travers la définition d'un corpus décrivant les compartiments de l'espace urbain (au sens spatial du terme, bâtiment, route, eau), cette ontologie assurera la complémentarité entre les différentes données géographiques et les échelles des représentations et des traitements. Le corpus sera enrichi de méthodes d'analyses spatiales cohérentes avec les objets d'étude, leur stockage dans une base de données (format, modèle) et leur échelle de visualisation et d'exploitation dans un SIG. Il permettra de poser les bases d'un SIG environnemental collaboratif (SIGEC), construit pour et par plusieurs disciplines. Notre travail sera composé de trois étapes :

1. La formalisation d'une ontologie urbaine appliquée à l'étude de la végétation. Cette étape conceptuelle figera un cadre pour produire une typologie des éléments de la végétation et référencer l'ensemble des méthodes qui seront appliquées dans le SIGEC pour déduire des indicatrices statistiques ou géographiques. Elle sera menée en collaboration avec le volet TYPO.
2. La mise en cohérence des différentes sources de données sur la base de cette ontologie afin d'assurer leurs intégrations dans le SIGEC. Des outils de médiation spécifiques seront développés.
3. La définition d'un Langage d'Analyse Spatiale Multi-Sources (LASMS), sémantique commune indépendante de la nature des données mais intégrant leurs spécificités (résolution, représentation raster ou vecteur, temporalité). Ce langage qui repose sur l'ontologie urbaine permettra à l'utilisateur de concevoir des règles de connaissances afin de classer les données dans le SIGEC et de produire des scénarios d'évolution à partir de raisonnements spatiaux (opérateurs, prédicats, topologies) et

des propriétés des objets. Ce LASMS sera mis en œuvre dans le cadre de PHYSIO 2. Nous l'exploiterons ensuite pour expérimenter des routines de simulation de la ville dans PHYSIO 3.

La construction du SIGEC reposera sur la plateforme OrbisGIS développée à l'IRSTV.

Travail réalisé :

Ontologie spatiale :

Face à la complexité du milieu urbain, 3 typologies sont produites pour définir le tissu urbain:

- *la couverture du sol* : elle correspond aux matériaux physiques à la surface de la terre, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique;
- *l'utilisation des sols*: elle correspond à la description des usages qui en sont faits par les hommes pour le modifier ou le maintenir en l'état;
- *les caractéristiques du sol* : elles définissent sa particularité, son originalité, sa distinction par rapport à quelque chose d'autre.

On se limite à la partie visible du sol, ce qui est en surface (sauf pour l'hydrographie où les nappes phréatiques et les sources pourront être définies et répertoriées, voire des réseaux...).

Cette nomenclature spatiale doit répondre au besoin des chercheurs en modélisation et doit être cohérente dans sa structure. Ces trois typologies sont déposées sur le site internet de VegDUD, l'idée est maintenant qu'elles soient testées et validées par les utilisateurs.

La typologie *couverture du sol* s'accompagne d'un thésaurus qui rassemble les définitions de chacun des termes utilisés.

Ce travail est donné dans le [rapport de \(Leveiller et al., 2013\)](#).

Les bases de données:

L'objectif initial était de combiner plusieurs sources de données pour avoir une base de données de références enrichies à partir du RGE, du MOS 44 et des résultats issus de traitement d'images satellites. Après plusieurs tests portant sur la compatibilité et la complémentarité des bases de données disponibles, il s'est avéré que plusieurs incohérences notamment au niveau des géométries rendaient leur croisement très difficile (cf. présentation de Gwendall Petit lors de l'AG de janvier 2010). Finalement, la BDTOPO, base de données vectorielle avec une assez bonne résolution spatiale a été retenue comme la base de données de référence, elle sera complétée avec les données issues de télédétection. Un travail particulier a été réalisé pour établir un certain nombre de règles de priorité notamment lorsque les données se superposent spatialement. Il est nécessaire de définir ce qui correspond à des zones d'ambiguïtés ou des zones de superposition (de la végétation sur une toiture de bâtiment par exemple). Il a été décidé qu'il était nécessaire de conserver l'information initiale afin que chacun puisse ensuite faire ses propres choix en terme de chevauchement des données. Par exemple en cas de chevauchement d'un arbre et d'une chaussée les modélisateurs souhaitent garder les deux informations car ils les utilisent à différents niveaux.

Le lien entre la base de données et la typologie *Couverture du sol* a été réalisé à travers le logiciel OrbisGIS. Un code numérique hiérarchique (1, 11, 111) a été ajouté à chaque concept de la typologie permettant par la suite de réaliser des requêtes sur les couvertures dans le SIG.

Développement du SIG :

Le langage GDMS qui est la base d'OrbisGIS a été complètement réécrit pour supporter maintenant tous les types de structure de données (vecteur, raster, topologie). Le modèle de données est basé sur une structure relationnelle ce qui permet à OrbisGIS de charger par exemple une table de données géographiques et de contraindre les champs d'une table avec les valeurs d'une autre table. Cette fonction est notamment utilisée pour proposer des valeurs provenant d'une typologie. Le langage contient également un meta-langage qui permet de transformer un script OrbisGIS en un flux de données WPS (Web Processing Services). Le WPS est un standard international pour le partage de géotraitements. Il a permis de construire la base de connaissances géographiques.

PHYSIO 2 – CARACTERISATION DES ESPACES VERTS PAR TELEDETECTION

Description initiale : Pour documenter un tissu urbain en perpétuelle évolution, les images satellites constituent une source d'information à fort potentiel, disponible quasiment en temps réel. La très haute résolution spatiale et spectrale permet d'identifier les différents objets qui composent le tissu urbain dont les zones de végétation. Des méthodes pour extraire les espaces verts en milieu urbain ont été proposées et testées. Par exemple (Tookey et al., 2009) comparent les deux méthodes de classification « Spectral Mixture Analysis » et « Decision Tree Classifications », (Iovan et al., 2007) utilisent une méthode orientée objet pour réaliser une modélisation en 3D à partir d'images aériennes.

Nous construisons une méthodologie qui combine les apports de la télédétection à très haute résolution spatiale dans plusieurs domaines du spectre électromagnétique. Nous utiliserons :

1. Des images satellites à très haute résolution spatiale (~2,5m voire moins selon les disponibilités) afin d'extraire les espaces verts en milieu urbain, notamment dans les quartiers à forte densité bâtie ;
2. Des images à très haute résolution spectrale qui permettent, en plus d'une simple détection surfacique, d'obtenir une information sur les types de végétation, d'essences, etc. ;
3. Des images du domaine infrarouge thermique dans lequel la végétation se caractérise par une forte réflectance.

Ces différentes approches sont complémentaires. Nous mettrons en évidence leurs apports spécifiques pour l'étude de la végétation dans le milieu particulier qu'est la ville où les zones à l'ombre et les petites surfaces de végétation enclavées dans le bâti, comme certains jardins privés, sont difficiles à détecter (Mathieu et al., 2007).

Pour l'imagerie hyperspectrale et dans l'infrarouge, nous utiliserons les bases de données produites par le volet TYPO 4 et les mesures réalisées dans EXPE 3 dont nous assurerons ici l'intégration afin de fournir une cartographie de la végétation du milieu urbain nantais.

Travail réalisé :

Image à très haute résolution spatiale:

Une approche par segmentation a été réalisée: différents indicateurs ont été testés pour parvenir à identifier et distinguer les modes d'occupation des sols. Deux zones ont été choisies comme zone test afin de s'assurer de la duplication de la méthodologie d'un secteur à un autre: île de Nantes et quartier Pin Sec.

A final, les enseignements sur les méthodes d'analyses sont les suivants :

L'approche pixel est limitée quant à l'extraction de la végétation en milieu urbain, l'utilisation de données THRS³ permet de distinguer les routes, des espaces verts, des bâtiments. De manière générale, l'utilisation d'attributs texturaux et de forme permet une meilleure détection des petits éléments.

L'extraction de la couverture végétale en milieu urbain et péri-urbain est de meilleure qualité dès lors que l'on traite des images THRS.

Au sein des zones résidentielles, le bilan est contrasté et dépend pour beaucoup des paramètres de segmentation appliqués. Plus la segmentation est fine, plus la détection des objets est précise. Néanmoins, la création d'objets de très petite taille a pour effet d'augmenter le nombre total d'objets, rendant les traitements plus longs. De plus, des erreurs peuvent être générées à partir du moment où la taille des objets est inférieure à la taille des pixels (surface de pixels : Spot 2,5 mètres : 6.25 m² ; QuickBird 2,4 mètres : 5.76 m²).

La résolution spatiale des données SPOT de 1993 et 2000 est un frein à l'observation de l'occupation du sol de Nantes Métropole. L'observation de pixels représentant au sol 400 m² entraîne inévitablement des confusions, la présence de pixels mixtes étant très importante. A cette échelle d'observation, seules les grandes entités homogènes sont visibles, et peuvent être correctement détectées, il est cependant dommage de devoir généraliser la classification afin d'obtenir des résultats statistiquement cohérents.

L'analyse d'image à une résolution plus fine (10 m) permet de déterminer un plus grand nombre d'éléments composant la couverture du sol en réduisant l'erreur potentielle. De trois classes détectées à une résolution de 20 m, ce sont huit classes qui sont distinguées à une résolution deux fois plus précise. Cependant, les résultats

³ Très Haute Résolution Spatiale

sont plus faibles, la précision globale de la classification étant tout juste de 73 %. Le problème de la résolution spatiale est toujours présent, bien que les habitations rurales soient en moyenne d'une superficie supérieure à 100 m², ce n'est pas forcément le cas en milieu péri-urbain et urbain. Dès lors la présence de pixels mixtes dus à la résolution spatiale entraîne des problèmes de détection, principalement en milieu urbain.

Se pose alors la problématique propre à la géométrie du pixel. Le découpage d'une image en pixels ne prend en compte que les caractéristiques spectrales de l'image. Il n'est dès lors pas étonnant d'obtenir une grande proportion de pixels mixtes, principalement en milieu urbain du fait de la superficie qu'un pixel englobe, contenant généralement plusieurs types d'occupation du sol. A 20 m de résolution, les pixels contiennent un mélange d'informations (présence de bâti, de végétation, de sols nus, de réseau de communication). Lorsque la surface des pixels est de 100 m² l'information contenue en leur sein est plus précise, il y a moins de pixels mixtes, néanmoins certains contiennent trop d'information hétérogène. A 2,5 m de résolution, la présence de pixels mixte est bien plus faible, à cette échelle du pixel une classification basée sur la signature de ce dernier n'est pas envisageable. A ce stade une observation de l'image par la méthode de l'AOO⁴ est pertinente.

Pour pallier cette faiblesse du pixel, la création d'objets sur lesquels repose l'analyse par classification semble être une bonne alternative. C'est sur cette logique que s'appuie le logiciel *eCognition* par le regroupement de pixels sous forme d'objets.

La classification de l'image SPOT de 2004 à 10 mètres de résolution spatiale par la méthode AOO présente cependant des résultats quasi similaires à l'AOP⁵. Ces résultats nous incitent à penser que dès lors que l'on souhaite effectuer une analyse par la méthode AOO, une image de résolution spatiale à 10 mètres n'est pas de qualité suffisante, surtout dans un environnement mixte mélangeant des territoires allant de l'hyper-centre urbain au bocage.

L'intérêt de la segmentation de l'image en objets plutôt qu'en pixel devient effectif dès que l'on traite des données THRS dont la résolution du pixel est inférieure à 5 m.

- Les données SPOT à 2,5 m de résolution spatiale et QuickBird à 2,4 m contiennent bien plus de pixels purs que les données dont la résolution est supérieure à 10 m. Il devient alors plus pertinent de regrouper ces pixels dont la surface est comprise entre 5,76 et 6,25 m² sous forme d'objets qui épousent les formes des éléments distinguables.

L'utilisation d'une méthode basée sur l'AOP, malgré la présence de pixels purs n'est pas envisageable lorsque la résolution spatiale est de l'ordre de 2,5 m. Bien que les pixels soient distinguables les uns des autres, leur hétérogénéité entraînerait la création d'un nombre trop important de classes et risquerait de générer de nombreuses erreurs de classification.

Plus la résolution spatiale est fine, plus la création d'objets permet d'améliorer la qualité des objets créés et d'isoler les différents éléments constitutifs de l'occupation du sol. La donnée QuickBird disponible à 0,6 m de résolution spatiale permet de créer des objets se rapprochant fortement de la réalité.

Cependant, le gain de précision obtenu par une précision spatiale accrue peut devenir une contrainte. En se basant sur l'exemple des réseaux de communication, la finesse de la précision permet de distinguer et d'identifier de nombreux nouveaux objets jusqu'alors non observables. En effet, une grande majorité des véhicules de type automobile peuvent être identifiés, il en va de même pour les marquages au sol de teinte blanche (type passage piéton). Ces éléments peuvent entraîner des confusions, notamment lors de l'utilisation d'indices basés sur la brillance. Il faut donc prendre quelques précautions lors de la détermination des éléments que l'on souhaite faire ressortir de la classification.

L'ensemble des résultats de classification est donné dans le [rapport \(Bellec and Long, 2014\)](#) dont une illustration est reproduite en Figure 2.

⁴ Approche Orientée Objet

⁵ Approche Orientée Pixel

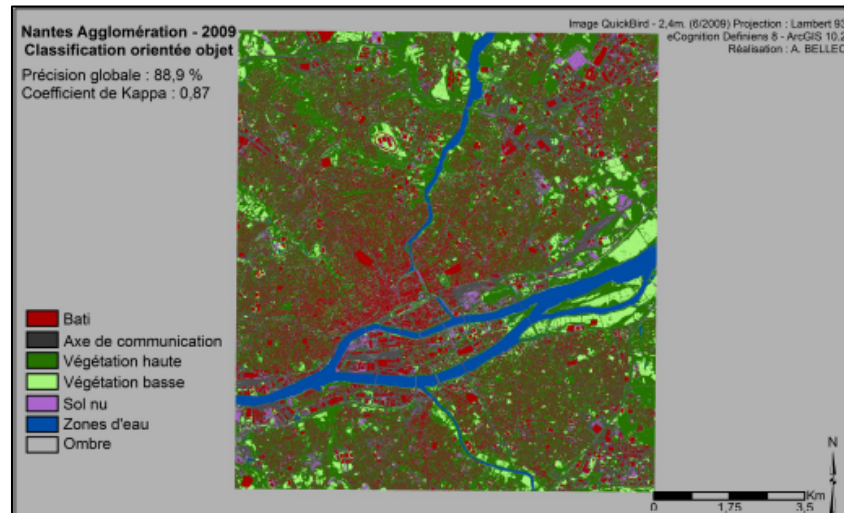


Figure 2 : Illustration de la Classification AOO sur une image QuickBird 2009, résolution 2,4 m (Bellec and Long, 2014).

Image hyperspectrale:

Lors de la campagne Fluxsap 2010, des images avec une caméra hyperspectrales ont été acquises sur le quartier étudié (Figure 3). Zeineb Kassouk, post-doctorante au LPGN, a ensuite produit une méthode d'analyse orientée objet de ces images et a fourni une base de données sur la végétation du quartier du Pin Sec avec identification de 9 espèces et distinction entre différents types de feuillus, les conifères et la pelouse. Ces données ont une résolution de 60 cm; cette précision n'est pas sans créer des problèmes car elle nécessite de traiter l'ensemble des objets présents au sol, comme les véhicules sur les routes... Pour chaque espèce identifiée, une valeur spectrale moyenne a été associée. Les résultats sur le quartier sont donnés dans la Figure 3 avec la classification d'espèces. Les résultats et le détail de la méthode sont donnés dans [un article soumis à Landscape and Urban Planning](#) et [une présentation](#).

Acquisitions hyperspectrales sur Nantes du 21/05/2010

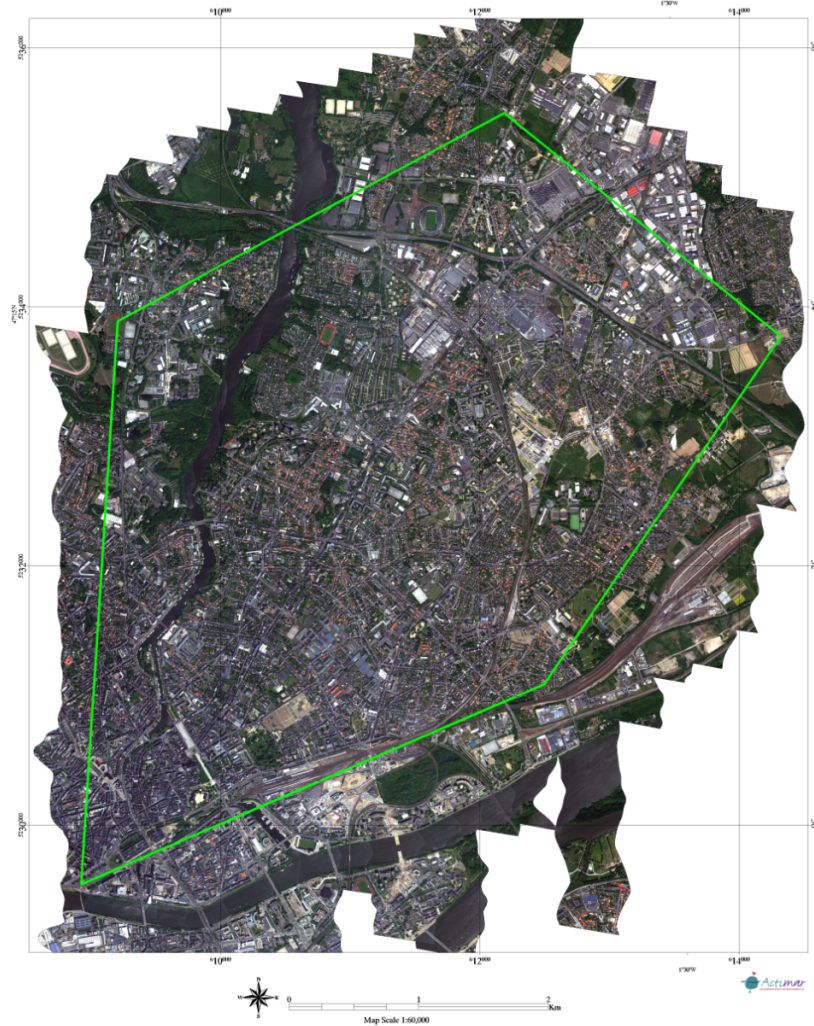


Figure 3 : Image acquise par télédétection hyperspectrale

En raison des trop grandes différences spectrales constatées entre les mesures de laboratoire et de terrain (Figure 4), la stratégie de collecte des données a dû être revue.

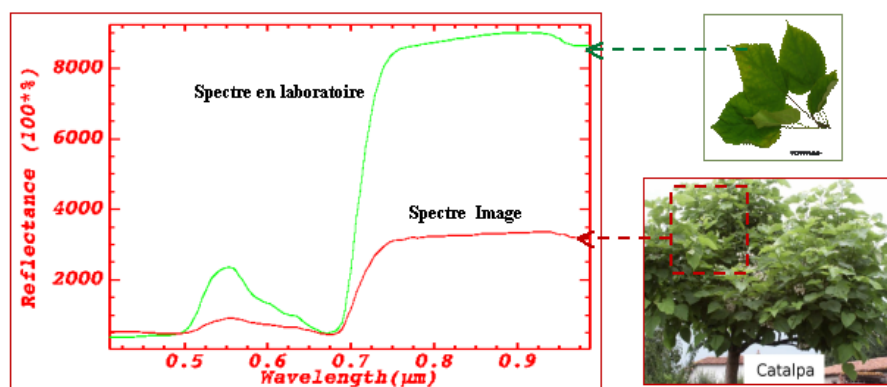


Figure 4 : Illustration d'impact de la distribution de l'ombrage à l'intérieur d'une frondaison ou dans un prélèvement de feuille sur la réponse spectrale.

Des mesures par nacelle pour échantillonner systématiquement toutes les frondaisons dans une géométrie comparable avec celle d'un avion n'ayant pas été prévues dans le projet, il a été décidé d'utiliser directement les données de l'image aéroportée pour documenter la réponse spectrale de la végétation (Figure 5). Ceci est possible grâce à la haute résolution spectrale des caméras comparable à celle du spectromètre de terrain et de laboratoire. La haute résolution spatiale dans le visible permet également d'avoir un point de mesure tous les 60 cm (caméra VNIR). Cette résolution n'est pas aussi élevée dans le SWIR avec 120 cm au sol.

Les types de végétation dépendant principalement des cortèges pigmentaires et de la réflectance forte des structures de feuille dans le proche IR nous avons mis la priorité sur la réalisation de cartes de végétation à partir des images VNIR à 60 cm au sol.

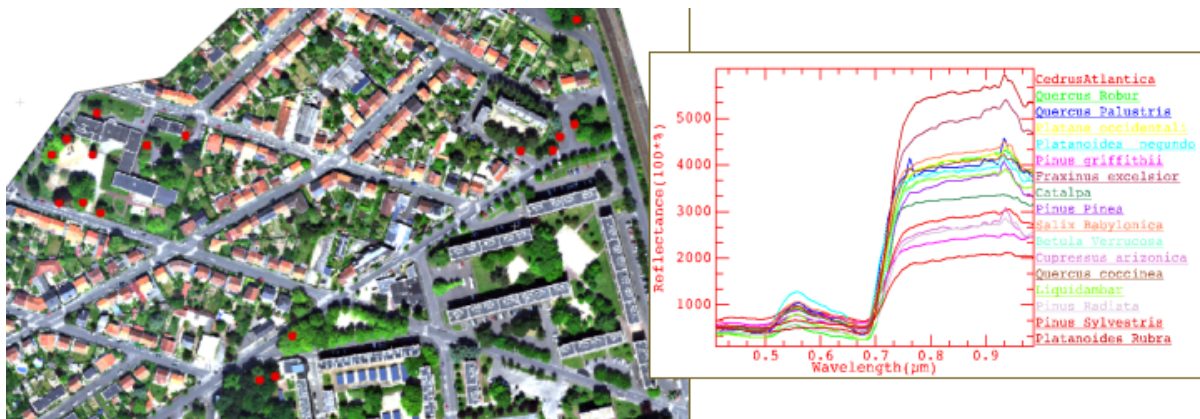


Figure 5 : Sites (points rouges) dont les espèces connues, ont été utilisées pour construire une librairie spectrale des espèces à partir de leurs spectres aéroportés.

La Figure 6 présente le principe de mesure des distances entre les spectres de la librairie spectrale de référence et les pixels de l'image. La métrique choisie est connue sous le nom de SAM pour Spectral Angle Mapping. Très commune en télédétection hyperspectrale cette mesure permet de tenir compte de l'ensemble des canaux de l'image soit 160 en VNIR et 344 lorsque les images VNIR et SWIR sont fusionnées.

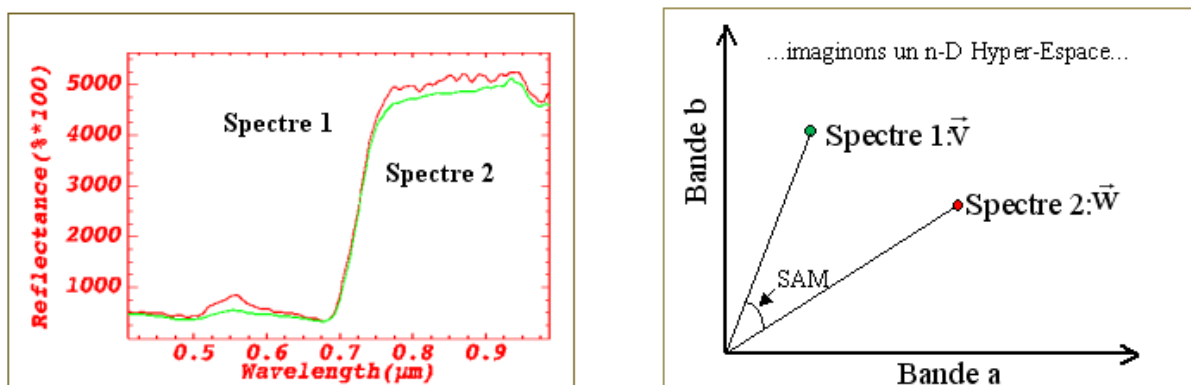


Figure 6 : Principe de mesure des distances entre les spectres de la librairie spectrale de référence et les pixels de l'image.



Figure 7 : Images utilisées, à gauche : composition colorée affichant les couleurs réelles ; au centre : mesure de l'angle entre chaque pixel et le spectre végétal de référence ; droite : indice utilisé.

L'extraction de l'information se fait ensuite par la recherche des espèces végétales de spectre visible IR identique aux familles identifiées. Dans la Figure 7, l'image de gauche est une composition colorée affichant les couleurs réelles. L'image du centre est la mesure de l'angle entre chaque pixel et le spectre végétal de référence. Plus un pixel est proche de la référence plus il est sombre car l'angle tend vers zéro. Pour des raisons pratiques permettant de mieux faire ressortir le végétal recherché on préfère calculer un indice sur l'image de droite. Cette fois plus le pixel a une signature spectrale proche du végétal recherché plus il est clair et plus il se détache facilement du fond de l'image. Les quelques arbres du parc arboré se distinguent mieux de leur voisin sur l'image de droite par rapport à l'image du centre. Si l'angle varie de 3,14 à 0 l'indice ($1/(\text{angle}+0,001)$) varie de 0 à 1000.

Les images servent à définir les objets de sélection des unités végétales (frondaison d'un arbre, d'un bosquet, partie d'une pelouse, ...) (Figure 8).

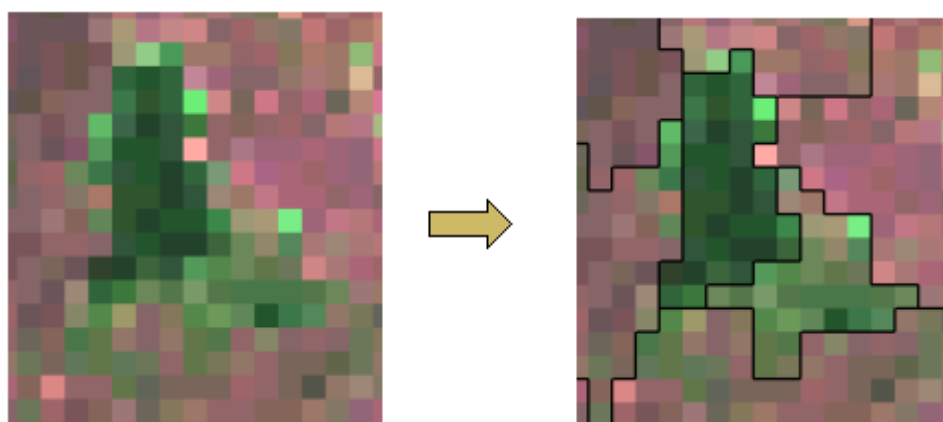


Figure 8 : Passage des pixels aux éléments végétaux par regroupement de pixels pour reconstituer des objets.

La Figure 8 montre comment à partir d'une composition colorée de trois canaux d'indice, sont exploitées les images. A gauche on peut voir qu'un objet est constitué d'un ensemble de pixels semblables formant un sous-ensemble. C'est cette propriété qui est exploitée pour délimiter à gauche une enveloppe de tous les pixels définissant un pixel. Pour cela l'équipe du LPGN a dû acquérir en plus du programme de l'ANR une licence e-cognition grâce à un financement de l'OSUNA.

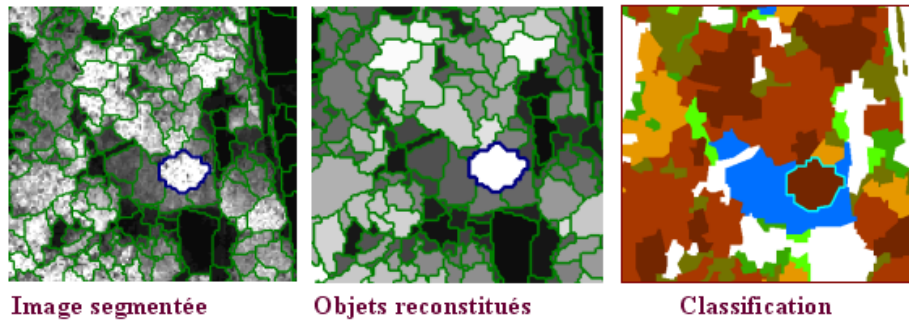


Figure 9 : illustration du passage des pixels, aux objets et à la classification

L'objet est ensuite utilisé pour calculer une réponse moyenne (Figure 9, image du centre). Il est alors possible de classer l'objet en lui attribuant une étiquette. Le processus n'est cependant pas figé. L'objet « reconstruit » contient l'information complète sur le spectre moyen. Tout opérateur peut alors choisir d'utiliser une autre métrique que le SAM et son indice pour reclasser tous les objets de la base de données.

On arrive au final à une classification sur l'ensemble de l'image acquise (Figure 10).



G1: *Fraxinus exelsior*, *Betula verrucosa*, *Quercus robur* ; G2: *Quercus palustris*, *Acer negundo*, *Catalpa bignonioides* ; G3: *Salix babylonica*, *Lonicera nitida*, *Platanus occidentalis* ; G4: *Liquidambar styraciflua*, *Quercus coccinea* ; G6: *Pinus radiata*, *Pinus pinea* ; G7: *Cedrus atlantica* ; G8: *Pinus sylvestris*, *Cupressus arizonica* ; G9: lawn ; G10: degraded lawn ; G11: shaded lawn ; G13: other plants ; G5: *Prunus cerasifera*, *Acer rubra* ; G12: *Sedum*

Figure 10 : Résultats de l'analyse des images acquises par télédétection hyperspectrale, d'après (Kassouk and Launeau, 2012)

Un travail complémentaire a été réalisé afin de traiter les zones d'ombres qui nécessitent un traitement spécifique. Ce travail fait l'objet de la thèse de Karine Adeline à l'ONERA (Adeline et al., 2013a, 2013b, 2012).

Télédétection Infrarouge :

Au cours de la campagne FluxSAP 2010, lors de 3 journées particulièrement ensoleillées, des vols de télédétection avec 2 caméras infrarouge, fixées sous un Piper Aztec volant à 600 m d'altitude, ont permis de

mesurer les températures de surface des sols et des bâtiments sous de multiples orientations et inclinaisons, pour chacune des heures du jour. Ces mesures étaient accompagnées par des mesures de température au sol sur des surfaces de référence. Elles devaient permettre d'enrichir une maquette 3D du quartier de l'information dynamique des températures de surface, afin de valider les modèles. Cependant, le travail nécessaire à la projection des images prises avec des visées obliques avant et arrière depuis l'avion dans la maquette 3D, de correction atmosphérique et de nettoyage des données en fonction de la précision des maquettes, avait été très fortement sous-estimée. Il aurait fallu consacrer une thèse à ce travail, ce que nous n'avons pu faire dans le cadre du projet VegDUD. De ce fait, seule une analyse partielle de ces données a été faite (exposée en EXPE 3) et nous projetons de reprogrammer ce travail dans la perspective d'un autre projet sur le diagnostic énergétique de quartiers.

PHYSIO 3 – PHYSIOGRAPHIE ALTERNATIVE

Description initiale : Suite à la définition des principes des scénarios alternatifs une physiographie alternative de la ville sera proposée. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place un modèle d'évolution formelle de la ville basée sur l'étalement-densification. Le tissu urbain n'évolue pas de manière homogène : certains facteurs favorisent l'extension urbaine où, au contraire, font réfléchir les planificateurs à des solutions alternatives (Antony, 2003; Badariotti et al., 2007). Des choix de modes de végétalisation peuvent influencer sur la forme de la ville, et réciproquement. Nous identifierons, hiérarchiserons et mettrons en relation les principaux facteurs qui rendent un espace plus ou moins constructible. Pour cela, la méthodologie sera développée autour de :

1. La définition de facteurs de constructibilité d'un espace urbain, principalement axée sur les facteurs physiques, réglementaires et de choix de gouvernance, notamment les politiques de végétalisation ;
2. La mise en place dans le SIGEC d'outils d'analyse spatio-temporelle aidant à la compréhension des phénomènes d'étalement-densification. Il s'agira par exemple de mesurer des vitesses d'étalement, ou la densité en fonction des modes de végétalisation mis en œuvre.
3. La conception d'un système de simulation d'évolution urbaine à base de contraintes définies précédemment (Dubos-Paillard and Langlois, 2003) permettant de proposer une physiographie alternative réaliste.

Ces approches permettront de mieux comprendre l'influence des choix de modes de végétalisation sur l'évolution de la forme de la ville et de la place relative des surfaces végétales de différents types.

Travail réalisé :

Dans cette troisième tâche, le modèle de simulation d'évolution urbaine a commencé par le travail d'un stagiaire au LIENSs (Antoine Renouard, ESGT Le Mans) complété par un stagiaire à l'IRSTV (Thomas Salliou, École Centrale de Nantes).

Antoine Renouard a construit conceptuellement un modèle d'évolution urbaine basé sur plusieurs choix et hypothèses:

- Choix de la zone d'étude : Nantes Métropole ;
- Choix de l'unité de référence: la parcelle agrégée (les parcelles sont agrégées en fonction de leur contiguïté) ;
- Choix du modèle: système multi-agent avec un agent *parcelle* (qui est construite ou qui peut se construire et qui a un type de quartier) et un agent *ménage* (qui naît, meurt, se reproduit et déménage et possède certaines caractéristiques comme âge, fortune, etc.) ;
- Définitions de règles d'évolution ;
- Réalisation de la carte/situation de départ.

Ce modèle conceptuel a ensuite été implémenté dans OrbisGIS par Thomas Salliou.

Les paramétrages du modèle ont ensuite été testés et affinés.

Au final, l'équipe du LIENSs a produit deux scénarios de l'agglomération de Nantes en 2030 qui ont été simulés, le premier où l'étalement urbain se poursuit, et un deuxième où la ville dense est favorisée (Figure 11). Le détail est donné dans l'article (Rousseaux et al., 2011).

L'ensemble des documents est disponible dans l'[ANNEXE 3](#).

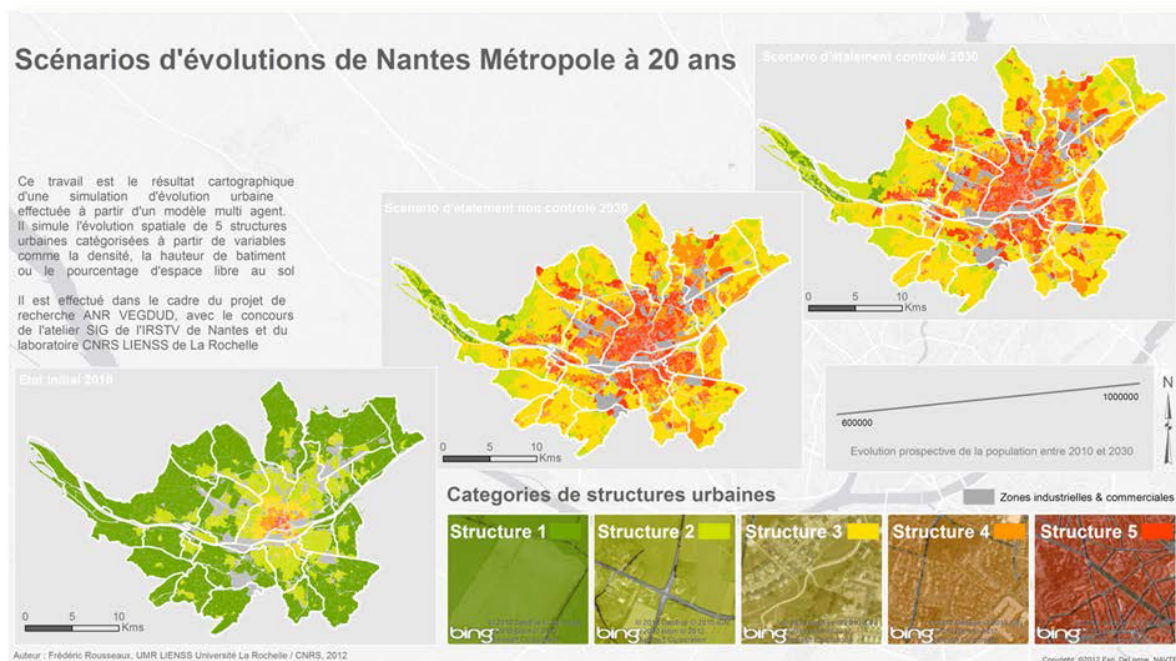


Figure 11: Scénarios d'évolution de Nantes Métropole à 20 ans.

RESULTATS :

- Deux techniques d'acquisition de la donnée végétale à l'échelle de la ville basées 1/ sur des images satellitaires (Bellec and Long, 2014) 2/ sur des acquisitions de données de télédétection hyperspectrale aéroportée acquises dans le projet ont été élaborées et appliquées au quartier nantais étudié (Kassouk et al., 2014, 2010).
- L'ensemble des fonctionnalités permettant de gérer la donnée hétérogène dans le système d'information géographique OrbisGIS a été mis en place (Leveiller et al., 2013).
- Un modèle de données spatio-temporelles a été développé et intégré à la plate-forme de données urbaines CartoPOLIS (Petit, 2013; Rannou, 2012)
- Un prototype de partage et de traitements des analyses spatiales a été développé (Gourlay and Bocher, 2011).
- Une chaîne d'évaluation de la qualité des données a été intégrée à OrbisGIS.
- Un modèle d'évolution des villes a été développé dans OrbisGIS (Rousseaux et al., 2012, 2011).

L'ensemble des documents disponibles est donné dans l'[ANNEXE 3](#).

4. VOLET 3 : EXPE - EXPERIMENTATIONS (J.-M. ROSANT,IRSTV/LHEEA, AVEC P. MESTAYER,IRSTV)

OBJECTIFS :

Il s'agissait dans ce volet d'évaluer la part prise par la végétation dans les bilans hydriques et énergétiques en milieu urbain et de contribuer à la validation quantitative des modèles d'hydro-météorologie urbaine intervenant dans le volet MODE. Le volet se décline en 4 actions : les mesures en continu, les campagnes expérimentales, la télédétection aéroportée et les études sur maquettes.

EXPÉ 1 – MESURES EN CONTINU

Description initiale : Le Secteur Atelier Pluridisciplinaire (SAP) de l'IRSTV à Nantes est instrumenté pour assurer en continu le suivi des flux d'eau, de rayonnement et de chaleur qui participent aux bilans énergétique et hydrique d'une zone urbaine située dans la "seconde couronne" de l'agglomération (Ruban et al., 2007). Il est constitué de 3 bassins versants (BV) emboîtés : Gohards Ruisseau (550 ha), Gohards Réseau (174 ha) et Pin Sec (31 ha). Sa structure est très hétérogène, typique de beaucoup d'aires urbaines françaises ou européennes : bâti contrasté, large fraction de petits espaces végétalisés.

L'instrumentation permet actuellement de mesurer les niveaux de saturation en plusieurs points du Pin Sec, ainsi que les débits dans les réseaux d'eaux pluviales et d'eaux usées et à leurs exutoires. Un dispositif complémentaire de mesure hydrodynamique ponctuel (tensiomètres + sondes TDR) sera installé sur un espace vert pour estimer le flux d'évaporation locale au sol, et des mesures de teneur en eau seront installées en différents points du SAP pour étudier la variabilité spatiale de ce paramètre. Par ailleurs, le suivi expérimental (hauteur d'eau et état hydrique du sol) d'une technique alternative végétalisée (noue) mise en place sur un éco-quartier mitoyen du Pin Sec sera aussi assuré.

Un mât météorologique de 30 m est installé sur le SAP, il est équipé pour évaluer les flux turbulents de chaleur sensible et chaleur latente / vapeur d'eau à deux niveaux. Les données sont enregistrées et traitées toutes les 15 minutes et les flux mesurés sont associés par un modèle de footprint (Schmid, 1994) aux zones sources qui les alimentent. L'étendue et la localisation de ces zones sources dépendent à la fois de la hauteur de mesure et des conditions météorologiques. L'interprétation des flux sera menée à partir d'une documentation détaillée des occupations des sols autour du mât, surtout concernant la végétation qui est le promoteur essentiel des flux d'évapotranspiration.

Pour un site non homogène, les gradients horizontaux de température et d'humidité impliquent des corrections importantes dans l'évaluation des flux de chaleur sensible et latente (Pigeon, 2007). Pour mieux comprendre le fonctionnement du microclimat à l'échelle des quartiers il faut connaître la distribution spatiale des températures et des humidités sur l'agglomération. Six sondes T-RH (température et humidité) sont actuellement en service. Il est proposé d'étendre ce réseau sur la ville pour un suivi permanent dans le but de comparer les environnements à dominante minérale ou à dominante végétale.

Travail réalisé :

Deux types de données ont été acquises en continu : des données hydrologiques et des données météorologiques locales.

- Le bilan hydrique du bassin versant du Pin sec (30 ha) a pu être établi à partir des mesures de pluie, de débits dans les deux réseaux d'assainissement, et des flux de chaleur latente (Jankowsky, 2012). Dans la dernière année du projet, l'éco-quartier voisin, Bottière-Chénaie, qui contient des dispositifs alternatifs de gestion des eaux pluviales (bassins, noues et toitures végétales) a également été instrumenté (Figure 12).

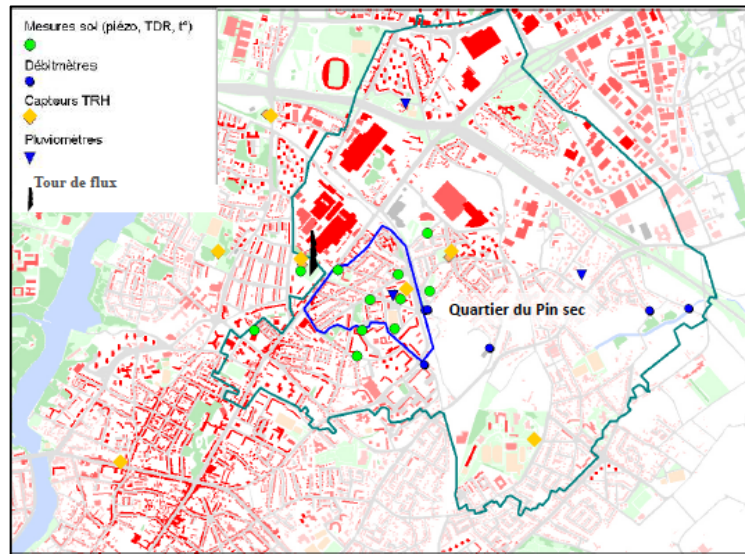


Figure 12: Contexte de l'observation hydro-météorologique

- Les mesures en continu obtenues au niveaux des deux mats, sur le quartier Pin-Sec sur une zones verte à côté du quartier ont permis pour les années 2010-2013 de caractériser le microclimat sur la zone du Pin Sec, de disposer des données de météorologiques locales, d'évaluer au fil des saisons les flux de chaleur, de vapeur d'eau et de CO₂ sur une zone sub-urbaine, hétérogène en termes d'occupation des sols.
- Le réseau de capteurs Température-Humidité Relative installé dans et autour du quartier, renforcé lors des campagnes nous a fourni des chroniques permettant la comparaison des sites par rapport à une référence prise à la station météo. Les valeurs de l'écart entre les températures mesurées en continu par les capteurs du réseau TRH et celle mesurée à la station Météo France, moyennées par saison ont été croisées aux taux de couverture végétale calculés autour des capteur. Une corrélation a été établie, plus représentative en été. Les profils journaliers de ces écarts peuvent être classés en deux types : zones d'îlot de fraîcheur et zones d'îlot de chaleur. Compte tenu des conditions climatiques pendant la période de mesure (couverture nuageuse importante, peu de journées très ensoleillées) et des zones de mesures dont la densité bâtie n'est pas très forte, ces écarts restent inférieurs en moyenne à 1,2 °C. Les corrélations avec les mesures d'humidité relative sont moins fiables.

Les figures de la Figure 13 à la Figure 15 donnent les différents types de résultats obtenus à partir du réseau.

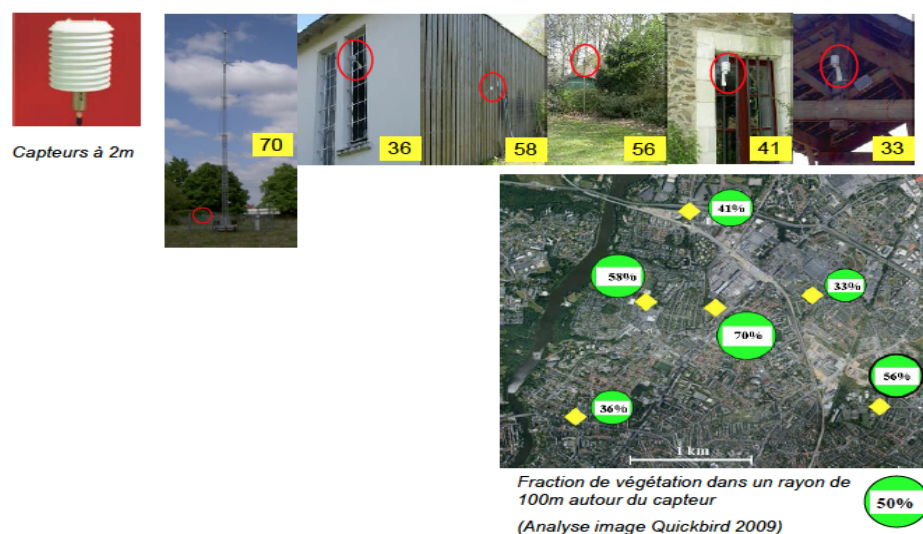


Figure 13: Points de mesure dans et autour du quartier Pin Sec et fraction de végétation autour des points

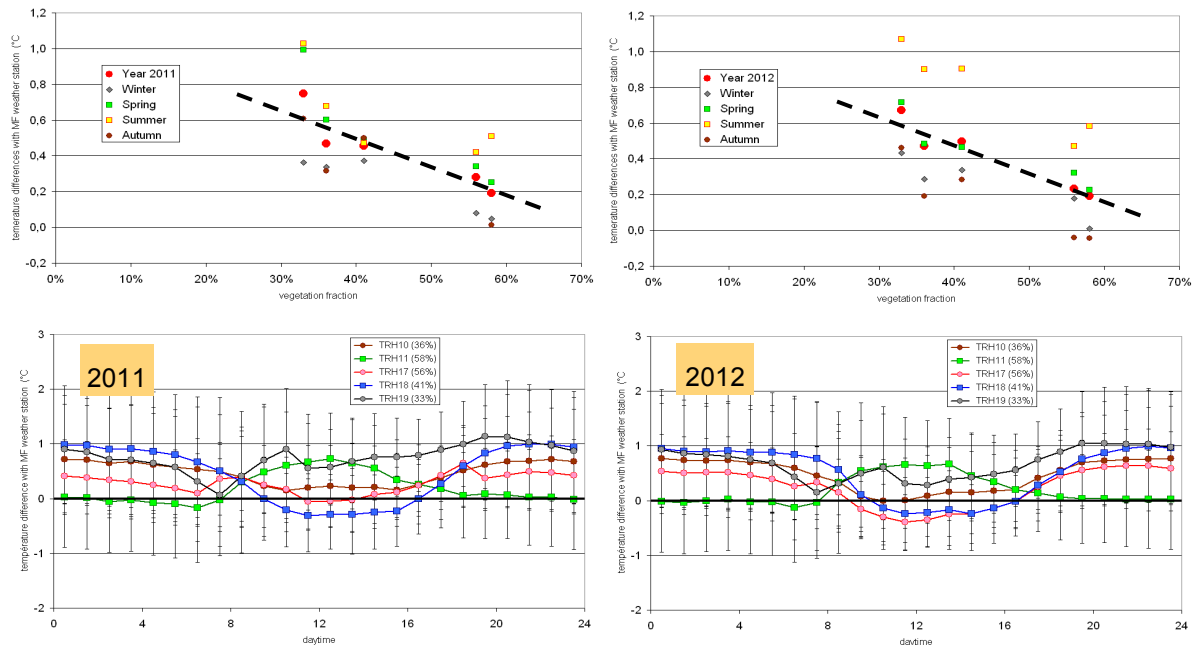


Figure 14. Écarts moyens entre températures des capteurs et celle de la station météo, par saison en fonction du taux de végétation du site (en haut), variation journalière des ces écarts moyennés sur l'année (en bas)

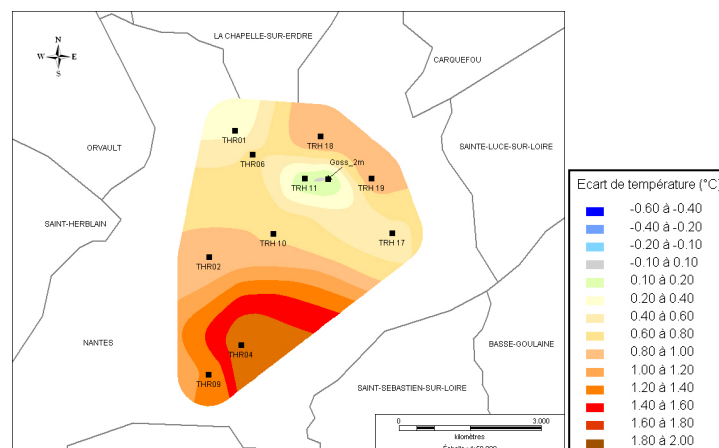


Figure 15: Cartographie des écarts de température sur Nantes à 22h, printemps 2013 (Rosant and Sabre, 2014a, 2014b)

La liste des données disponibles est donnée dans les deux documents distinguant les données centralisées par l'[IFSTTAR](#) et le [LHEEA/IRSTV](#).

EXPÉ 2 – CAMPAGNES EXPERIMENTALES

Description initiale : Deux campagnes (2 fois 4 semaines) sont proposées dans ce projet, avec pour objectif principal d'évaluer les flux de chaleur sensible et latente avec la spatialisation la plus fine possible. Il s'agit notamment d'identifier/séparer les contributions respectives des bâtiments, des surfaces artificialisées et de la végétation ou des sols végétalisés ; et, vice-versa, de déterminer comment elles s'intègrent à l'échelle du quartier hétérogène. Elles comprendront cinq types de

mesures : mesures au sol, mesures ponctuelles de flux sur des mats météo, mesures de flux spatialement intégrés, télédétection aéroportée, dispersion de traceurs passif. En parallèle, sur certains des sites sélectionnés, les paramètres influents pour la propagation acoustique en milieu urbain végétalisé seront recueillis et utilisés en entrée des modèles de prévision ad hoc (Cf. volet MODE).

La première campagne aura lieu au printemps 2010 avec un dispositif plus réduit. Elle aura pour objet de compléter les données du suivi permanent pour la validation des modèles d'hydrométéorologie urbaine et de footprints et servira de pré-campagne de faisabilité en préparation de la campagne principale de 2011.

Mesures au sol

Il s'agit de densifier sur le SAP le réseau de capteurs de température et humidité de l'air et de teneur en eau du sol, à partir desquels on pourra, à terme et après "apprentissage" du fonctionnement thermo-hydrique du SAP, suivre en continu les flux de chaleur et vapeur d'eau des différentes parcelles instrumentées. La résolution nécessaire de ce réseau de capteurs sera déterminée par l'analyse de la variabilité spatiale de la température du sol à partir de la thermographie aéroportée (voir ci-dessous). De plus, le suivi expérimental du bilan hydrique de l'éco quartier (Bottière Chêne) sera réalisé sur l'année hydrologique 2011, afin de déterminer l'impact des dispositifs alternatifs végétalisés sur les flux hydriques à l'échelle du quartier ; une mesure du flux d'évaporation sera en particulier installée sur cet éco-quartier, afin d'étudier l'effet de la végétalisation sur ces flux d'évaporation, en comparaison des mesures réalisées sur des espaces plus artificiels pendant la campagne coopérative de 2011.

Dispersion de traceurs passifs

L'adaptation des modèles de footprint au tissu urbain hétérogène constitue un domaine de recherche encore ouvert qui implique une approche expérimentale in situ pour documenter la dispersion horizontale et verticale en prenant en compte les particularités locales. Plusieurs expériences de traçages atmosphériques seront mises en œuvre sur le SAP en liaison avec les mesures de flux sur le mât. La source gazeuse au sol sera mobile et les prélèvements seront réalisés régulièrement à plusieurs hauteurs sur le mât et sous un ballon captif. L'interprétation des résultats obtenus au cours des campagnes de 2010 et 2011 justifiera la pertinence des mesures de flux sur le mât par rapport à la zone d'intérêt sur laquelle sont calculés les bilans.

Mesures ponctuelles et spatialement intégrées des flux

Durant la campagne 2011, un dispositif sera déployé pour évaluer la distribution spatiale des flux sur la zone et l'apprécier en fonction de la densité de végétation environnante. Ce dispositif comprendra d'une part plusieurs mâts météorologiques (2 mâts de 30 m et une dizaine de mâts de 10 m) équipés de capteurs rapides permettant la mesure des flux provenant de zones sources réduites et bien identifiées. D'autre part des mesures de flux de chaleur sensible intégrés sur des distances de l'ordre du km, provenant donc de zones sources élargies, seront réalisées par plusieurs équipes avec au moins 4 scintillomètres. Différents protocoles sont possibles, qui seront testés durant la pré-campagne de 2010, en fonction des contraintes propres d'installation et des particularités du quartier considéré. Pour évaluer l'impact de l'hétérogénéité du site sur la mesure, les scintillomètres pourront être placés sur des trajets différents ou sur des transects décalés. Pour la campagne de 2011 un ou deux scintillomètres PIR (actuellement en cours de développement) seront déployés, permettant de mesurer directement les flux de chaleur latente intégrés.

Pour chacune des campagnes, on envisage un dispositif d'accompagnement pour documenter plus finement les conditions météorologiques locales : profils de vent et de turbulence par Sodar, profil de température sous le ballon captif, ainsi que des radiosondages.

Travail réalisé :

La première campagne expérimentale (FluxSAP 2010) a eu lieu, comme prévu en mai-juin 2010. La seconde campagne initialement prévue au printemps 2011 a été reportée à 2012 pour plusieurs raisons :

- La 1^{ère} campagne n'a au final pas été une pré-campagne comme prévu, mais a permis de développer un dispositif plus important ;
- Tous les résultats n'étaient pas encore exploités au moment où la préparation de la seconde campagne aurait dû débuter ;

Ce report permet de mieux adapter la campagne aux dispositifs étudiés et ne remettrait pas en cause la validation des modèles étant donné que les résultats de la 1^{ère} campagne permettaient déjà de commencer cette validation. Par ailleurs, les exploitations de la 2^{ème} campagne étaient prévus plus rapides car déjà mises au point lors de la 1^{ère} (excepté pour les mesures qui n'ont pas été faites en 1^{ère} campagne qui seront faites

dans la 2^{ème}). La seconde campagne hyperspectrale n'a pas été autant décalée, mais s'est déroulée en septembre 2011.

Partie intégrante de VegDUD, les campagnes ont été cofinancées dans le cadre d'un programme FluxSAP soutenu par l'INSU du CNRS au travers des appels à projets EC2CO/CYTRIX et LEFE/IDAO, coordonné par Patrice Mestayer et Jean-Michel Rosant et Fabrice Rodriguez.

Campagne expérimentale FluxSAP 2010 (P. Mestayer et al., 2011; P. G. Mestayer et al., 2011) : Le rapport de la campagne est donné en [ANNEXE 4](#).

FluxSAP 2010 présentait un double caractère de campagne de faisabilité et de campagne de référence. C'était une campagne de faisabilité car la première campagne expérimentale réalisée sur une zone urbaine hétérogène et il s'agissait de tester des méthodes de mesure et les méthodes d'analyse associées pour séparer les contributions aux flux de chaleur et de vapeur d'eau; il s'agissait également de déterminer les instrumentations supplémentaires qu'il est à la fois nécessaire et possible de développer pour la campagne de 2012. C'était aussi une campagne de référence qui a alimenté en données les modélisations développées dans le cadre du projet dès 2010.

Les mesures avaient 5 objectifs :

- 1 – Obtenir des estimations fiables des flux de chaleur et de vapeur d'eau en continu et en plusieurs points du domaine, en utilisant la méthode de référence "eddy-correlation" avec des capteurs de fluctuations turbulentes de la vitesse, la température et la concentration de vapeur d'eau installés à différentes hauteurs au-dessus du sol ;
- 2 – Evaluer la distribution spatiale de la disponibilité en eau et en chaleur des surfaces urbaines par des méthodes de cartographie des températures et des humidités s'appuyant sur des mesures au sol et sur des thermographies infrarouge aéroportées ;
- 3 – Mettre en oeuvre des scintillomètres infrarouge permettant d'évaluer le flux de chaleur sensible intégré sur des zones beaucoup larges et hétérogènes ;
- 4 – Evaluer les modèles de "footprints" permettant de déterminer les zones sources génératrices des flux mesurés en fonction des conditions de mesure ;
- 5 – Caractériser les propriétés thermiques, hydriques et radiatives des matériaux et des sols par télédétection hyperspectrale.

La campagne FluxSAP 2010 s'est déroulée pendant 4 semaines, au mois de mai dont le climat est favorable à l'observation d'une large gamme de situations météorologiques. Elle était concentrée autour du quartier du Pin Sec déjà instrumenté par l'IRSTV pour des observations permanentes d'hydrologie et de météorologie urbaine. Elle comprenait quatre types de mesures :

- Des mesures météorologiques et des flux turbulents sur une série de mâts météo et de supports d'opportunité de 10 à 30 m de haut sur des espaces dégagés ;
- Des mesures de température et teneur en eau dans le sol, température et humidité à la surface du sol et entre 2 et 3 m au dessus du sol ;
- Des mesures de scintillométrie à partir des toits-terrasses de 4 bâtiments élevés ;
- Des mesures de températures de surface par télédétection infrarouge aéroportée avec deux caméras à bord du PA23 du SAFIRE, une caméra au sommet de la Tour Bretagne, et deux radiothermomètres au sol ;
- des mesures de télédétection hyperspectrale aéroportées avec le spectromètre à balayage Hyspecs à bord de l'avion d'Actimar et au sol avec le spectromètre portable ASD ;
- Des mesures de dispersion de traceurs passifs sous un petit ballon captif.

Douze équipes ont participé aux mesures. Les capteurs ont été installés durant la dernière semaine d'avril et la première semaine de mai, opérationnels pour la plupart pendant 3 semaines, puis démontés à partir du 30 mai. Les mesures de télédétection aéroportée ont été réalisées du 21 au 23 mai, les mesures de dispersion du 18 au 27 mai.

Campagne expérimentale FluxSAP 2012 :

Si le dispositif de mesure de 2010 était relativement satisfaisant pour une campagne "de faisabilité", il était insuffisant sur plusieurs points : (a) l'évaluation des bilans d'eau, (b) la documentation d'échelle supérieure, (c) l'évaluation des modèles de footprints, (d) l'intercomparaison des capteurs, (e) les flux de chaleur générés par les bâtiments (f) la connaissance du fonctionnement énergétique à une échelle locale. Les objectifs de la campagne 2012 ont permis de progresser sur ces points en mettant en oeuvre les actions suivantes :

- (a) Plusieurs actions seront abordées pour mieux évaluer le bilan hydrique.

a1) la connaissance de la distribution spatiale de la pluie et la détermination de la structure spatiale climatologique des événements pluvieux a été affinée sur ce secteur, grâce à une analyse climatologique de la variabilité spatiale des champs pluvieux aux échelles de l'hydrologie urbaine à partir des données du radar de Nantes-Treillières

a2) l'évaluation directe du flux de vapeur d'eau par la méthode eddy-correlation (EC), mettant en œuvre un anémo-thermomètre sonique et un hygromètre rapide, a été complétée : si le parc de soniques disponibles est suffisant, le nombre d'hygromètres Li-Cor a été augmenté, en favorisant en particulier des mesures de flux au-dessus de petites parcelles d'occupation du sol contrastées (parc potager, pelouse et zone commerciale très minérale). En tout, 6 sites ont été équipés avec des mesures des flux de chaleur latente et 8 sites avec des mesures des flux de chaleur sensibles.



Figure 16 : Installation de mesures de flux par eddy correlation sur des mats au sol ou sur des bâtiments

a3) Le site pilote pour la mesure de l'évapotranspiration d'un couvert végétal suivant 3 méthodes a été choisi dans la zone sécurisée où est installé le mât météorologique permanent de l'IRSTV (site industriel Goss). Sur ce site relativement ouvert on trouve une surface avec un enherbement naturel et une surface engazonnée (pelouse de stade). Les 3 méthodes qui ont été mises en œuvre sont : (i) flux dans le sol à partir de mesures hydrodynamiques (suction, teneur en eau) sur le premier mètre de sol, (ii) flux dans les premiers mètres de l'atmosphère avec un anémo-thermomètre sonique et un hygromètre rapide installés sur un mat de 3m, et (iii) flux par chambre de transpiration.

a4) des mesures d'évapotranspiration ponctuelles ont été réalisées à l'aide d'une chambre de transpiration pour évaluer la sensibilité de cette variable vis-à-vis de différents dispositifs végétalisés. La chambre de transpiration développée par le CETE Ile de France a été installée sur des journées ensoleillées ayant eu lieu durant la campagne et sur des espaces verts situés dans le secteur du quartier du Pin sec : pelouse d'espace vert public, pelouse de jardin individuel, toiture terrasse végétalisée, espace vert sur dalle...

(b) Les profils verticaux de température, humidité et vitesse du vent à basse altitude au-dessus de la zone de mesure sont cruciaux pour les analyses (stabilité thermique, corrections des signaux de télédétection) et pour les simulations numériques. L'IRSN a développé avec l'IRSTV une nacelle instrumentée pour réaliser des profils verticaux de pression, température, humidité, vitesse du vent (système PTUV, Figure 17). La nacelle est constituée de capteurs PTU, d'un anémomètre, d'une girouette permettant à la nacelle de se positionner dans l'axe du vent, d'un GPS et d'un système de transmission par onde radio. Le système est complété par une station d'acquisition et de référence au sol. Ce système a été déployé lors de la campagne expérimentale FluxSAP 2012, simultanément à la réalisation des campagnes de dispersion atmosphérique par traceur passif. La nacelle instrumentée était fixée sous un ballon captif de 15m³ gonflé à l'hélium, qui était monté et descendu manuellement, de 0 à 100m d'altitude, afin de réaliser des profils verticaux. Pendant la réalisation du profil, les données étaient instantanément transmises au système d'acquisition installé dans le camion laboratoire au sol, par ondes radio à 1 Hz. De plus, sur le même site et pendant la totalité de la campagne, on a pu disposer d'un Lidar installé par EDF (EDT R&D, Département MFEE, Chatou). Les profils moyens de vitesse et de turbulence ont été mesurés au pas de 10 min sans interruption du 25 Mai au 27 Juin, à 12 niveaux entre 40 et 200m.



Figure 17 : Vues de la nacelle PTUV instrumentée, au sol et lors de profils sous ballon captif.

(c) La dispersion de traceurs passifs est utilisée pour tester et améliorer les modèles de footprint. (Schmid, 1997) ayant démontré que les footprints des flux sont différentes des celles des concentrations, la mise au point d'un système de mesure ponctuelle du flux de SF₆ paraît nécessaire pour FluxSAP 2012. Compte tenu des capacités des analyseurs de SF₆ actuels la méthode REA ("relaxed eddy accumulation"), a été développée par l'IRSN et testée lors de la campagne 2010 ; cette méthode a été validée lors d'une campagne préparatoire avec l'équipe INRA/Ephyse à Bordeaux et mise en œuvre lors de Fluxsap2012 sur le mât de l'IRSTV à 21m d'altitude, sur le site de Goss. Durant la campagne expérimentale, 28 émissions de gaz traceur SF₆ ont été réalisées ; ces émissions ont été effectuées à différentes distances du mât (de 70 à 650m), dans différentes directions selon la provenance du vent, et pour différentes conditions atmosphériques (3 émissions de nuit en conditions de forte stabilité). Lors de ces émissions, le système REA était mis en route durant 30 min, durant lesquelles le système remplissait deux sacs d'air, selon la direction de la composante verticale du vent. La mesure a posteriori du traceur SF₆ dans les deux sacs de prélèvement, permet ensuite de calculer un flux de SF₆, dans le sens "up" ou "down". Ces flux, mesurés expérimentalement, seront confrontés aux résultats des modèles de footprint.

(d) l'analyse des données de la campagne 2010 a montré que certaines interrogations persistaient sur les différences observées entre les mesures réalisées, en particulier en ce qui concerne les mesures par eddy-corrélation et par scintillométrie. Une pré-campagne d'intercomparaison des systèmes EC a été réalisée la semaine avant l'installation des matériels sur les différents sites. Elle s'est déroulée du 16 au 22 Mai sur une zone enherbée du site de IFSTTAR à Bouguenais. Pour des raisons de disponibilité des moyens et des personnels, seules les équipes nantaises (LHEEA et CSTB) y ont participé (4 systèmes testés). Une autre campagne d'intercomparaison a été organisée sur le site de IFSTTAR du 28 Juin au 4 Juillet, après la campagne FluxSAP. Un système EC du LHEEA a été gardé en référence et toutes les équipes extérieures (LHTE, LSIIT, IRSN/LRC) ont pu participer (4 systèmes testés). Un étalonnage des Licor a également été réalisé au préalable par le LHEEA avant la campagne. D'autre part une campagne d'intercomparaison des scintillomètres a été réalisée sur le site de l'INRA à Bordeaux par EPHYSE (Irvine et al., 2011).

(e) Mieux identifier les flux de chaleur générés par la végétation passe aussi par une meilleure identification des flux de chaleur générés par les surfaces minérales. En parallèle de la connaissance détaillée des matériaux de surface permise par l'analyse des données hyperspectrales recueillies en 2010 et 2011 sur le secteur (Kassouk et al., 2011) plusieurs expérimentations ont été réalisées au sein du volet « mesures embarquées » :

e1) cartographie des températures de surface et émissivités sur les surfaces horizontales avec le spectromètre AHS aéroporté pendant une POI6, et sur les surfaces verticales avec un système mobile (LNE), pour déterminer les coefficients de transfert thermique des bâtiments

e2) mesure de paramètres météorologiques, dont les températures de surface, sur des transects au sein du quartier avec le véhicule instrumenté Thermoroute (LR Nancy)

(f) Le suivi hydrique et énergétique d'une parcelle individuelle a été mis en œuvre lors de la campagne 2012 et coordonné par le CNRM (campagne Jardin). L'objectif était d'acquérir un jeu de données météorologiques pour mieux comprendre les interactions entre la végétation et le bâti dans une zone résidentielle.

La campagne 2012 s'est déroulée sur les 4 semaines du mois de juin, l'essentiel des capteurs étant installés le 25 mai et les démontages s'étant échelonnés entre le 02 et le 13 juillet. La campagne s'est déroulée avec des conditions météorologiques pas très favorables pour la mesure des flux de chaleur, mais présentant une gamme de situations météorologiques intéressante, et un vent essentiellement de secteur Ouest et Sud-Ouest. Seule une période initiale de quelques jours a été très ensoleillée, le mois de juin a ensuite été assez instable avec de nombreuses périodes pluvieuses. Le cumul de pluie du mois de juin sur le secteur de la campagne, 60 mm, est légèrement supérieur à la moyenne pluviométrique du mois de juin à la station de Bouguenais (45 mm), et la variabilité spatiale de la pluie semble assez importante pour les averses qui ont eu lieu sur cette période. Quelques événements pluvieux assez remarquables ont eu lieu le 11 et le 20 juin, avec des intensités pluvieuses assez importantes (~18 mm/h en 5 minutes). Trois Périodes d'Observation Intensive (POI) ont été programmées : une dans le cadre du volet « dispersion » et deux dans le cadre des volets « jardin » et « mesures embarquées » ; ces deux dernières, initialement prévues sur des périodes très ensoleillées, ont été réalisées de façon déconnectée sur deux périodes avec un temps variable en raison de l'instabilité de la météo sur cette période.

Résultats des campagnes expérimentales

Sans être exhaustif, ce paragraphe propose d'illustrer quelques résultats marquants de la campagne 2012 qui illustrent le fonctionnement hydrique et énergétique des surfaces végétalisées du secteur d'étude.

Influence de la végétation sur les flux de chaleur

Les dispositifs de mesure de flux de chaleur déployés durant la campagne Fluxsap 2012 permettent d'étudier des zones contrastées en terme d'occupation du sol (Figure 18). Le taux de couverture végétale estimé à partir de l'analyse des données satellite de l'image Quickbird de 2009 (Chen, 2013) varie entre 7% pour le site instrumenté sur une zone commerciale (PARI) et 76% pour le site situé sur une zone enherbée à basse altitude (GOSS3).

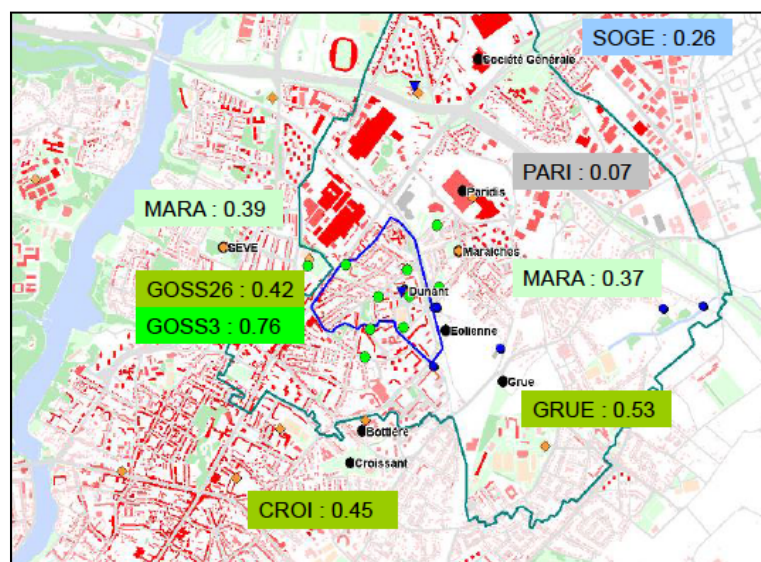


Figure 18 : Localisation des mats et estimation du taux de couverture végétale (dans un rayon de 200m autour)

Les mesures de flux de chaleur réalisées durant le mois de juin 2012 montrent une forte variabilité entre ces différents sites. Le profil journalier type des mesures réalisées entre le 29 mai et le 26 juin a été établi en

moyennant les flux semi-horaires durant la journée (entre 7h et 20h). Ce profil type indique un contraste marqué, tant pour les flux de chaleur sensible (Figure 19) que pour les flux de chaleur latente (Figure 19) entre les sites très minéraux et les sites très végétalisés. Cela est particulièrement visible sur les deux sites les plus contrastés (PARI et GOSS3), ce qui tend à démontrer le rôle caractéristique de la végétation sur les flux de chaleur et son « pouvoir rafraîchissant » en milieu urbain. A titre d'exemple, dans le site le plus végétalisé du quartier nantais du Pin sec (76% de végétation), pour une journée du mois de juin 2012, jusqu'à 67% du rayonnement net était transformé en chaleur latente en moyenne, alors que sur un site très minéral (zone commerciale couverte à 7% par la végétation) cette transformation n'est que de 20%. Les résultats sont moins contrastés pour les autres sites dont les taux de couverture végétale sont intermédiaires ; le fait que le taux de végétation soit ici estimé de façon homogène autour du point de mesure peut être remis en cause : il serait plus juste d'estimer le taux de végétation dans la zone correspondant au footprint de la mesure, qui varie en fonction des conditions turbulentes. Ce travail a été réalisé sur 3 sites de mesures (PARI, GOSS3 et GOSS26) (Chen, 2013) et a permis de montrer une tendance de la fraction évaporative à croître avec la fraction de végétation.

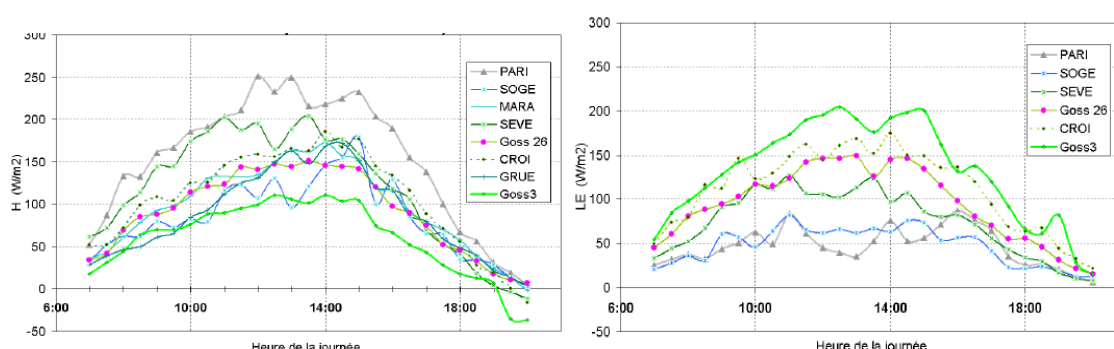
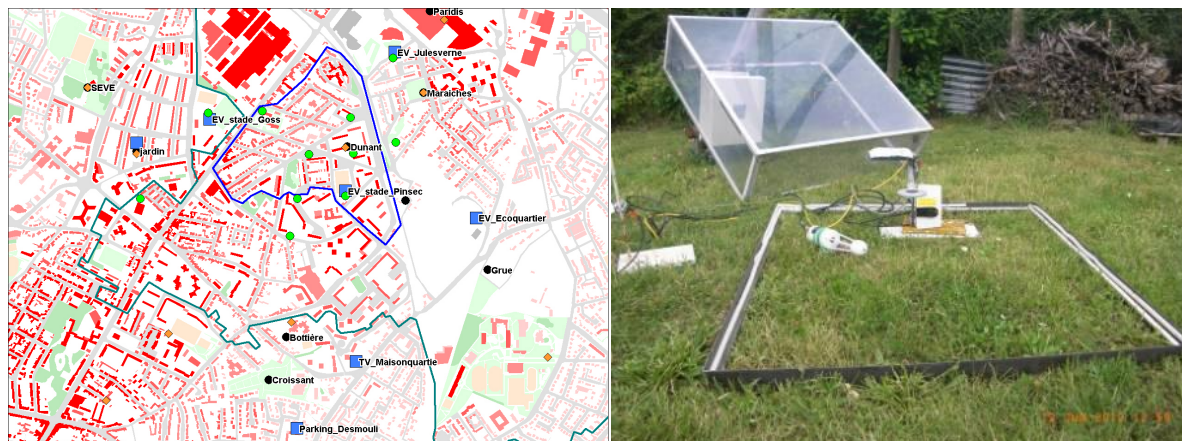


Figure 19 : Flux de chaleur sensible (à gauche) et latente (à droite) moyens, de 7h à 20h au mois de juin 2012.

Les résultats des mesures de scintillométrie ont été présentés au meeting de Tübingen en 2013 (Irvine et al., 2013). La variabilité des flux mesurés s'est révélée faible et il n'y a pas eu de contrastes affirmés entre quartiers.

Influence du type de végétation sur le flux d'évapotranspiration

La chambre à transpiration développée par le CETE Ile de France a permis de réaliser des mesures sur des espaces verts répartis autour du quartier du Pin sec (Figure 20). Des journées ensoleillées ont été choisies pour obtenir des cycles journaliers caractéristiques, mais les conditions météorologiques n'ont pas toujours été favorables à ces mesures. Le dispositif de mesure permettait d'étudier les variations rapides de température et d'humidité dans la chambre durant des cycles de pose courts (~2 minutes) espacés d'une demi-heure. L'analyse de ces variations permet de déduire un flux d'évapotranspiration semi-horaire. La comparaison du flux d'évapotranspiration déduit de ce dispositif avec des mesures d'eddy-correlation a été effectuée sur 2 sites, dont le site de Goss sur lequel un petit mat de 3m avait été installé afin de mesurer une évapotranspiration à proximité de la surface sur les espaces enherbés de cette zone. La comparaison est satisfaisante et permet de considérer que ces mesures sont pertinentes (Figure 21).



a) Position des différents sites de mesures de l'évapotranspiration (carrés bleus)

b) Dispositif de mesure – Chambre à transpiration (CETE Ile de France)

Figure 20 : Déploiement des mesures d'évapotranspiration à l'aide de la chambre à transpiration durant la campagne Fluxsap 2012.

Les mesures réalisées sur différents dispositifs végétalisés ont été analysées en calculant le flux de chaleur latente et le rayonnement net sur toute la journée (entre 7h et 17h en raison de la durée plus restreinte de certaines « journées » de mesure) et en comparant les cycles journaliers mesurés. Afin de comparer les résultats obtenus sur les différents dispositifs, la fraction évaporative « journalière », considérée égale au rapport du flux de chaleur latente moyen journalier sur le rayonnement net moyen journalier, afin de s'affranchir partiellement des différences météorologiques entre les journées de mesure. Cette fraction évaporative moyenne indique une certaine variabilité entre les sites investigués, même si cette variabilité est modérée (entre 0.18 et 0.29) : les sites qui possèdent une fraction évaporative la plus élevée sont ceux qui sont engazonnés et pour lesquels la végétation peut puiser de l'eau dans le sol (jardins individuels, espaces verts standards). Les sites végétalisés qui ont une fraction évaporative plus faible sont ceux qui possèdent une végétation plus atypique (sédum sur la toiture végétalisée) et surtout sans relation avec le sol : la toiture végétalisée observée possède un substrat très peu épais (3 cm), et l'espace vert « hors sol » est une couche de terre végétale de 50 cm située au dessus d'une dalle en béton recouvrant un parking d'un immeuble collectif.

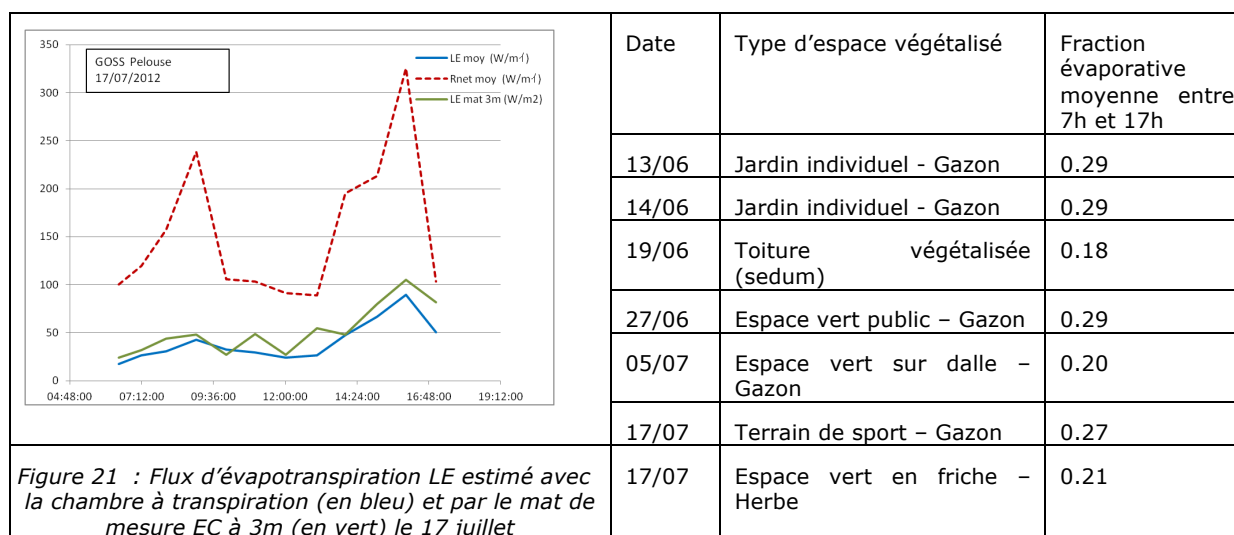


Tableau 1 : Fractions évaporatives moyennes (dans la journée) estimées à partir des mesures réalisées avec la chambre de transpiration (Fraction évaporative estimée par le rapport du flux de chaleur latente sur le rayonnement net)

En parallèle de ces travaux, des recherches nécessaires à l'exploitation des résultats ont été réalisés. La thèse d'Insaf Bagga (Bagga, 2012), le post-doc de Carina Furusho (Furusho, 2012; Furusho et al., 2012), et la thèse de Véra Rodrigues (Rodrigues et al., 2013, 2012) ont contribué à la détermination des *footprints*.

La liste des données disponibles est reportée dans les deux documents distinguant les données centralisées par l'[l'IFSTTAR](#) et le [LHEEA/IRSTV](#).

EXPÉ 3 – TELEDETECTION AEROPORTEE

Description initiale :

Thermographie par télédétection aéroportée

Du fait de l'hétérogénéité des matériaux urbains (sols, végétation, bâtiments), de leurs fonctionnements thermiques, et de leurs orientations par rapport au soleil, on observe de fortes différences dans les températures obtenues par télédétection infrarouge selon la direction et l'angle de la mesure. Cette anisotropie directionnelle peut être documentée par télédétection aéroportée avec une caméra infrarouge thermique (IRT) en visée inclinée lors de plusieurs survols successifs du même quartier selon des orientations différentes (Lagouarde et al., 2004). L'analyse des données obtenues sur Marseille en 2001 et Toulouse en 2004, montre qu'une démarche combinant mesures au sol et simulations thermo-radiatives avec le modèle SOLENE permet de retrouver avec une bonne précision la distribution angulaire de l'anisotropie des températures de brillance observées par télédétection. Une méthode basée sur l'inversion de cette démarche, en cours de développement et de test sur les données de la campagne de Toulouse, doit permettre d'évaluer séparément les flux de

chaleur des bâtiments et des sols à partir des données de télédétection aéroportée. La méthode pourra ensuite être étendue aux surfaces végétalisées et, par analogie, aux flux de chaleur latente.

Deux séries de vols sont prévues au cours de chacune des campagnes de 2010 et 2011, avec une caméra infrarouge (FLIR B4 de l'IRSTV ou SC 2000 de l'INRA). En s'appuyant sur les cartographies établies dans le volet PHYSIO 2, ils permettront (1) de tester la méthode de séparation des flux de chaleur, (2) de cartographier les flux sur la zone d'étude, (3) de documenter avec une précision métrique la variabilité des températures de surface nécessaire pour déterminer la densité du réseau de capteurs au sol.

Télédétection hyperspectrale

La première campagne sur le SAP en Juillet 2008, avec le spectro-imageur Hysens aéroporté par le DLR a permis de démontrer la puissance de la méthode pour la détection et l'identification des matériaux, notamment la présence de végétation même dans des pixels mixtes, mais aussi les limites d'une imagerie obtenue à une résolution spatiale de 4 m (Roy et al., 2009).

Les spectro-imageurs aéroportés acquis par le LPGN en 2009 (0,4-1 μm et 1-2,5 μm) seront mis en œuvre par la société ACTIMAR pour obtenir une résolution inférieure à 1 m. Les vols seront réalisés au cours des campagnes expérimentales pour bénéficier des mesures de température et humidité au sol et en altitude (radiosonsages) et de l'infrastructure permettant des mesures de référence au sol (vérité terrain). En effet la qualité des analyses dépend fortement des corrections atmosphériques, y compris dans les zones d'ombre, et des comparaisons à des mesures simultanées sur des cibles de référence au sol avec des spectromètres portables. Le traitement des données s'appuiera également sur la base de données spectrographiques du volet TYPO 4 et sur les précédentes cartographies et la base de données 3D du SIGEC (volet PHYSIO 1).

Les stratégies de vol pour les télédétections aéroportées hyperspectrale et infrarouge thermique ne semblent pas compatibles : balayage continu et visée verticale dans un cas, vols pluridirectionnels et visée inclinée dans l'autre. Cependant on tentera une harmonisation dans la mesure du possible, en couplant une caméra IRT (ou un spectro-imageur IRT si disponible) aux caméras hyperspectrales pour étendre la méthodologie de détection de la végétation dans le domaine [2,5 ; 14 μm], en coopération avec le projet SVETIR.

Travail réalisé :

La division que nous avons réalisée lors du montage du projet en TYPO 4 pour la caractérisation optique des matériaux, EXPE 3 pour la mise en place et la réalisation des campagnes de télédétection aéroportée et PHYSIO 2 pour l'exploitation cartographique des données acquise, rend peu lisible le bilan.

Aussi, nous ne reviendrons pas sur les résultats de la télédétection hyperspectrale qui ont été donnés en PHYSIO 2. Concernant la partie Infrarouge, elle n'a pas été décrite dans PHYSIO 2 puisque la partie cartographie n'a pu être réalisée.

Télédétection Infrarouge :

Les logiciels permettant de mettre en œuvre une méthode d'analyse simplifiée de l'anisotropie directionnelle de la température de surface obtenue par télédétection aéroportée ont été créés par Guillaume Fontanilles. Cette méthode reprend celle utilisée par (Lagouarde et al., 2004) en négligeant, dans un premier temps, l'influence de l'altitude de l'avion au cours des branches de chaque vol en considérant que les angles d'altitude se compensent statistiquement. L'analyse de 2 vols a été réalisée. Après prise en main de la méthode, l'analyse des autres vols a été réalisée par Antoine Teillet (Teillet, 2011).

EXPÉ 4 – ETUDES SUR MAQUETTES

Description initiale :

Soufflerie PIV

Les effets de la présence d'espaces végétalisés au sein de la ville sur la dynamique du vent seront évalués dans la soufflerie atmosphérique du LMF. La technique par PIV fournit une description spatio-temporelle détaillée des structures turbulentes, en particulier les rafales associées aux zones de transition (Dupont and Brunet, 2008). Pour servir de validation aux modèles, les mesures seront réalisées sur des configurations académiques reconstituant à différentes échelles des juxtapositions de zones bâties et de zones végétalisées (parcs, squares).

Plate-forme CLIMABAT

La plate-forme du LEPTIAB, implantée en site extérieur, est constituée d'un ensemble de 5 bâtiments identiques, à l'échelle 1:10, formant 4 rues canyon parallèles. Les bâtiments sont faits de blocs creux en béton. Ils peuvent être aménagés sur de longues périodes avec une toiture ou une façade végétalisées pour mener des études comparatives en référence au bâtiment nu. L'instrumentation est prévue pour évaluer chacune des composantes des bilans énergétiques et hydriques des bâtiments. Les paramètres les plus favorables contrôlant les transferts d'eau entre les substrats et la végétation et assurant ainsi la survie des plantes seront recherchés.

Soufflerie climatique et bassin climatique

Pour différentes conditions météorologiques types, des essais seront réalisées au CSTB dans la soufflerie climatique et dans le bassin climatique AQUASIM pour établir des bilans hydriques à l'échelle 1 sur des bacs végétalisés de 1 m².

Travail réalisé :

Soufflerie PIV :

Les études en soufflerie ont été réalisées en plusieurs étapes. Un premier travail de post-doctorat (Perret and Ruiz, 2011; Ruiz, 2011) a permis de mettre en place la simulation de l'écoulement au dessus d'une canopée végétale (Figure 22).



Figure 22: Vues de la soufflerie et de la modélisation de la canopée forestière.

C'est ensuite l'évolution de l'écoulement turbulent au-dessus de la transition ville-forêt (Dong, 2012; Perret and Dong, 2014) qui a été documentée.

Plateforme AQUASIM

Un des objectifs du CSTB dans VegDUD est d'évaluer les performances hydriques des toitures terrasses végétalisées (TTV). En raison des demandes de modifications budgétaires du contrat par l'ANR, les essais en bassin climatique n'ont pas été réalisés.

Le CSTB a réalisé 7 ouvrages de 2,25 m² qui représentent des toitures terrasses avec différentes configurations (en mono culture), placées près de la plateforme AQUASIM (Figure 23). Avec l'aide du CRITT Horticole de Rochefort/mer, une sélection du substrat et des espèces végétales a mené à réaliser : un bac gravier 8 cm (B0); deux bacs avec substrat nu de 8 et 12 cm d'épaisseur (B1 & B2); deux bacs avec sédum (Sédum Album) sur substrat de 8 et 12 cm d'épaisseur (B4 & B3); un bac avec graminée (Festuca Glauca) sur substrat de 12 cm d'épaisseur (B5); un bac avec œilletons (Dianthus Deltoïd) sur substrat de 12 cm d'épaisseur (B6).

Ces éléments de toitures terrasses ont été instrumentés à l'aide de sondes de teneur en eau type TDR et de sondes de température afin d'estimer le volume d'eau dans les toitures d'une part et le profil de température (mesures sous, dans et sur le substrat) d'autre part. Un suivi de l'ensemble des mesures a été réalisé en continu à l'aide d'une centrale d'acquisition. Les débits de ruissellement ont été collectés à l'aide d'augets basculeurs et également suivi en automatique par la centrale. Une station météo est disposée à proximité des ouvrages. Les valeurs d'évapotranspirations ont été estimées à l'aide de trois méthodes : - Bilan Hydrique ; - Bilan Énergétique ; - Modélisation numérique (résolution de l'équation de Richards).

Les résultats expérimentaux ont permis de mettre en évidence que les performances hydriques des toitures sont meilleures en été qu'en hiver; que l'épaisseur du substrat était un des paramètres clés sur les effets de rétention (donc limitation du ruissellement) mais aussi que ces effets étaient plus ou moins importants selon l'espèce végétale utilisée. Exemple sur un été la rétention des eaux pluviales était de 22% sur le gravier alors qu'elle était de 81% et 91% pour le Sedum (8 et 12 cm) et de 94% pour les œillets (12 cm). Même constat pour les résultats d'évapotranspiration qui diffèrent selon l'épaisseur du substrat et l'espèce végétale, 180 et 203 mm pour le Sedum (8 et 12 cm) et de 216mm pour les œillets (12 cm). Les 2 années de suivi de la plateforme ont finalement révélé l'importance de la maintenance des toitures sans laquelle elles dépérissent.

Les résultats de ces travaux (troisième et dernière phase) vont contribuer, d'une part, à proposer des valeurs d'évapotranspiration et de coefficient de ruissellement en fonction du type de configuration de TTV. Et d'autre part, le comportement des TTV sera étudié en fonction du type de végétation, de l'épaisseur du substrat et comparé à une toiture terrasse en gravier.



Figure 23 : Bacs de toitures végétalisées, à droites les graminées.

Plateforme CLIMATBAT :

Climabat est une maquette d'un îlot urbain à l'échelle 1:10 (Figure 24). Elle est construite sur le site universitaire de La Rochelle et est formée de 5 rangées de 3 cuves de récupération d'eau pluviale (1.26x1.68x1.13 m³) juxtaposées. Les 5 rangées simulent ainsi des bâtiments séparés par des rues canyons de rapport de forme Largeur/Hauteur de l'ordre de l'unité. Les façades des bâtiments sont orientées Est/Ouest et le vent d'ouest est prédominant.

La mise en place d'écran façade du côté Ouest de la plateforme a permis de créer une configuration semblable pour la dernière rangée de bâtiments par rapport aux autres qui sont confinés entre deux rues, ce qui permet d'investiguer plus de possibilités expérimentales sur la plateforme.

Des simulations réalisées dans le cadre d'une thèse soutenue auparavant, ont permis de vérifier l'équivalence des températures maximales atteintes sur la maquette et celles atteintes sur un modèle d'un bâtiment à l'échelle réelle.

L'objectif dans le projet VegDUD est de déterminer l'impact des façades et des toitures végétalisées sur l'environnement proche et donc l'impact microclimatique à l'échelle de la rue. Des systèmes de façades végétalisées ont donc été mis en place et instrumentés. Les mesures (températures, humidité, flux de chaleur) réalisés sur les bâtiments et les rues végétalisés ont ainsi pu être comparées à un bâtiment et une rue de référence. Les résultats expérimentaux ont également permis de calibrer le modèle numérique de comportement d'un composant végétal mais aussi de procéder à sa validation (Djedjig, 2013; Djedjig et al., 2011).



Figure 24 : Vues de la plateforme climabat et de la façade végétalisée.

RÉSULTATS :

- Les mesures en continu, sur le quartier Pin-Sec ont permis pour les années 2010-2013 de caractériser le microclimat sur la zone du Pin Sec, de disposer des données météorologiques locales, d'évaluer au fil des saisons les flux de chaleur, de vapeur d'eau et de CO₂ sur une zone sub-urbaine, hétérogène en termes d'occupation des sols.
- Le bilan hydrique du bassin versant du Pin sec (30 ha) a pu être établi à partir des mesures de pluie, de débits dans les deux réseaux d'assainissement, et des flux de chaleur latente (Jankowsky, 2012).
- Les valeurs de l'écart entre les températures mesurées en continu par les capteurs du réseau TRH et celles mesurées à la station Météo France, moyennées par saison sont corrélées au taux de couverture végétale calculé autour des capteurs, la corrélation étant plus représentative en été. Nous trouvons deux types de profils journaliers de ces écarts : des zones d'îlot de fraîcheur et des zones d'îlot de chaleur. Les corrélations avec les mesures d'humidité relative sont moins fiables.
- Les mesures de flux de chaleur pendant les campagnes FluxSAP 2010 et 2012, montrent pour la variation journalière des flux de chaleur sensible et latent un contraste marqué entre les sites très minéraux et les sites très végétalisés, démontrant ainsi le « pouvoir rafraîchissant » de la végétation.
- L'expérimentation sur la plateforme ClimaBat a permis de mettre au point un modèle détaillé de façade végétale (Djedjig et al., 2012),
- Le comportement hydrique de plusieurs types de toitures végétales a été caractérisé (Yilmaz et al., 2012).
- Les études en soufflerie ont permis de préciser l'évolution de l'écoulement turbulent au-dessus de la transition ville-forêt (Perret and Dong, 2014).
- Des acquisitions de télédétection aéroportée infrarouge et hyperspectrales ont été réalisées et exploitées.

L'ensemble des documents disponibles est donné dans l'[ANNEXE 4](#).

5. VOLET 4 : MODE - REPRESENTATION DE LA VEGETATION DANS LES MODELES CLIMATIQUES, THERMIQUES ET ACOUSTIQUES (C. INARD, LASIE & H. ANDRIEU, IFSTTAR)

OBJECTIFS :

L'objectif du volet modélisation était de proposer une représentation plus pertinente de la végétation dans les modèles qui sont nécessaires aux évaluations dans les domaines de la climatologie urbaine, la thermique et les ambiances.

Ce volet modélisation était également destiné à renforcer les collaborations entre des équipes de recherche qui proviennent de communautés différentes. Il est indissociable du volet EXPE, dont dépend la validation des

schémas proposés, et éventuellement leur amélioration. Il est également indissociable des volets d'évaluation : on modélise pour évaluer par la suite des dispositifs et des scénarios.

Au démarrage du projet, les équipes du volet MODE ont organisé un séminaire de présentation des modèles et il est très rapidement apparu, que les modèles qui semblaient avoir les mêmes objets d'application relevaient en fait d'hypothèses très différentes, et que plutôt que d'être redondants, ils étaient tout à fait complémentaires. Il a donc été décidé de travailler à partir des propositions du volet TYPOLOGIE en répartissant le travail de modélisation afin d'avoir au final des évaluations aussi complètes que possible. Le Tableau 2 donne la répartition qui a été notre objectif, conciliant nos capacités de développement, et les échelles appréhendées par chaque modèle. Ceci explique certains écarts entre le projet initial et sa réalisation.

Modèle Equipe	Solene- microclim at CERMA	ARPS- canopée EPHYSE &LMF	Solene- microclimat CERMA &GEPEA	URBS IFSTTAR	Méthode TLM IFSTTAR	TRNSYS LaSIE	Surfex TEB CNRM &IFSTTAR
Variable calculée	Confort extérieur	Variables climatique s et flux	Demande énergétique, confort intérieur	Volume ruisselé, répartition des composantes, état hydrique du sol	Indicateurs acoustiques (SPL, TR)	Confort extérieur & intérieur, énergie	V, T, H%, Flux, impact énergétique, variables hydrologiques
D1	P1 Quartier- P2 + P1 Rue	P1+ P2 Quartier+	P1 +P2 Quartier- Rue &	P1 Quartier	P2 + P1 (sur toitures) Rue	P1 + P2 Rue & Bâtiment	P1 + P2 Quartier+ Ville (Toitures)
D2		P1+ P2 Quartier+		P1 Quartier			P1 + P2 Quartier+ Ville
D3	P1 Quartier-	P1+ P2 Quartier+	P1 +P2 Quartier Rue &	P1 Quartier			P1 + P2 Quartier+ Ville
D4				P1 Quartier			
D5	P1 Quartier- P2 + P1 Rue	P1+ P2 Quartier+	P1 +P2 Quartier Rue &	P1 Quartier			

Tableau 2 : Répartition des évaluations, dispositifs, échelles et paramètres traités, par modèle et équipes.

D1 = végétation enveloppant les bâtiments (toitures et façades végétalisées) ; D2 = techniques alternatives de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal ; D3 = surfaces enherbées vs surfaces sans couvert végétal ; D4 = végétation de pleine terre vs hors sol ; D5 = arbres ; P1 = Paramètre de gestion du couvert végétal (gestion extensive, intensive, superposition de strates...) ; P2 = Paramètre de morphologie (relation forme urbaine/forme végétale, taille et répartition des espaces verts ; Quartier+ = échelle du très grand quartier ou partie d'une ville ; Quartier- = échelle inférieure au quartier, peut être l'îlot ou le groupe d'îlots).

MODE 1 – MODELISATION DES EFFETS DE DISPOSITIFS VEGETAUX SUR LES FACTEURS PHYSIQUES D'AMBIANCE

Description initiale : Pour les questions de confort, l'étude du microclimat urbain est effectuée à l'échelle de l'environnement bâti afin de prendre en compte les hétérogénéités dans les champs de facteurs physiques d'ambiance, liés à la présence des éléments végétaux et des bâtiments. La ville est donc ici considérée à l'échelle du fragment urbain (de la rue à l'îlot).

Ambiances thermiques

Les équipes porteuses de ce projet ont développé des approches de modélisation différentes :

Le CERMA a couplé son modèle thermo-radiatif urbain SOLENE à un code de dynamique des fluides (Robitu et al., 2006, 2004) permettant l'obtention des données nécessaires à la simulation du confort (champs de vitesse, d'humidité, de température de l'air et des parois). Dans ce modèle, les arbres ont été modélisés d'une manière schématique (houppier sphérique).

Le CESBIO a introduit les surfaces urbaines dans un modèle initialement dédié aux transferts radiatifs entre l'atmosphère et les surfaces naturelles (Gastellu-Etchegorry et al., 1996). Le modèle résultant, DART-Energy Budget, détermine les bilans d'énergie au niveau des surfaces solides, dans les mailles occupées par la végétation, dans les couches atmosphériques.

Tout d'abord, nous comparerons ces modèles appliqués à des rues canyons pour une approche simplifiée, mais aussi sur des cas plus réalistes pour évaluer leurs capacités à simuler des formes urbaines réelles. Il s'agira de définir le modèle le mieux adapté aux objectifs visés dans le projet : comparaison de l'influence de dispositifs végétaux sur le confort. Cette comparaison sera le départ d'un travail collaboratif destiné à améliorer ce modèle en tirant parti des différentes approches.

Environnement sonore

Afin de quantifier les effets de différents types de végétation sur la propagation sonore, les modèles numériques de simulation acoustique en milieu urbain SPPS (Picaut, 2005) et TLM (Guillaume et al., 2008) devront être adaptés pour prendre en compte les effets micro-météorologiques (réfraction, turbulence) et les effets de l'absorption dans le milieu végétal (impédance complexe). Ces nouvelles données d'entrée seront caractérisées in-situ lors des campagnes expérimentales.

Travail réalisé :

Compte tenu de l'enveloppe budgétaire qui lui avait été réservée, l'équipe du CESBIO, sous-traitante dans le projet, n'a pas pu s'investir autant que nous l'avions prévu dans le projet. Elle a concentré son action dans le volet EXPE, pour lequel elle amenait un savoir-faire et du matériel. De ce fait, nous avons réorienté ce sous-volet en sous-volet de préparation des modèles pour les évaluations relatives aux ambiances physiques.

Ambiances thermiques (IRSTV/CERMA/LaSIE)

Au CERMA, la thèse de Laurent Malys ((Malys, 2012a) financement ADEME & Région des Pays de la Loire) a porté sur la modélisation des surfaces végétales dans le modèle SOLENE-microclimat. Une première partie de son travail a consisté à transférer ce qui a été fait dans deux thèses précédentes (Robitu, 2005 ; Bouyer, 2009) suite à un changement d'environnement (passage du code commercial FLUENT au code SATURNE). Il s'est ensuite consacré à la modélisation des enveloppes de bâtiments végétalisées (Malys et al., 2014) (Figure 25). Il a pour cela utilisé les mesures expérimentales de l'HEPIA à Genève (Figure 26).

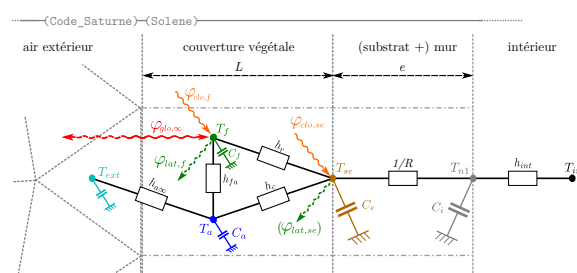


Figure 25 : Principe du modèle mis en place dans SOLENE-microclimat.



Figure 26 : Expérimentations de façades végétales utilisées pour la mise en place du modèle dans SOLENE-microclimat.

Rabah Djedjig a réalisé sa thèse sur financement ANR au LaSIE. Il s'agit principalement d'évaluer l'impact de la végétation sur la consommation énergétique des bâtiments. Pour cela des modèles de toitures et de façades végétalisées ont été développés dans TRNSYS (Djedjig et al., 2012) et validé sur la base de l'expérimentation ClimaBAT présentée ci-dessus.

Environnement sonore (IFSTTAR)

A l'iffstar après une [étude bibliographique \(Gauvreau, 2011\)](#) des développements numériques du modèle de propagation acoustique (TLM) ont été réalisés dans le cadre du contrat post-doctoral de Gwenaël Guillaume (2012-2013, 18 mois). Après une phase de validation qualitative et quantitative (benchmarks numériques et/ou comparaisons avec des résultats expérimentaux), ces nouveaux développements (sous Matlab et OpenCL) ont permis de prendre en compte les conditions d'impédance particulières des revêtements végétalisés. Cette démarche a donc nécessité plusieurs mesures *in-situ* de toitures et façades. Un travail important a également été effectué afin de réduire les temps de calcul dans la perspective de simuler un grand nombre de cas pour les volets d'évaluation (Guillaume and Fortin, 2013; Guillaume et al., 2013, 2012).

MODE 2 – MODELISATION DE L'IMPACT DE LA VEGETATION SUR LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS

Description initiale : L'approche proposée consiste en trois étapes. La première vise à dégager les modifications microclimatiques dues à la végétalisation locale qui sont susceptibles d'avoir un impact sur les consommations énergétiques des bâtiments. La seconde mettra en relation les impacts énergétiques (consommations hiver et été) et les modifications des flux sur l'enveloppe pour différents types de bâtiments. La troisième exploitera les résultats précédents pour passer à l'échelle du quartier.

Modélisation du bâtiment dans son environnement

L'étude du microclimat urbain est nécessaire pour une bonne prise en compte des interactions entre l'environnement et la demande d'énergie des bâtiments (effets du vent, des phénomènes d'îlot de chaleur...) que le modèle résultant du travail développé dans MODE 1 permettra d'appréhender. Il sera enrichi d'une représentation détaillée des dispositifs végétaux susceptibles d'influer sur les besoins énergétiques : enveloppes végétalisées, traitement végétal des pieds de bâtiments... La modélisation de ces typologies sera développée à partir des données regroupées dans le volet TYPO.

Modélisation du bâtiment

Pour mesurer l'impact de la végétation intégrée à l'enveloppe sur la consommation énergétique d'un bâtiment, il est nécessaire de faire des simulations de thermique dynamique du bâtiment. Pour ces simulations, le modèle utilisé devra intégrer la modification de l'enveloppe du bâtiment liée à la présence de la végétation. Le travail consistera donc ici à implémenter les modèles des composants de façades et de toitures végétalisés spécifiquement identifiés dans la tâche TYPO dans un code éprouvé de simulation thermique et hydrique du bâtiment, TRNSYS.

Modélisation du quartier

L'évaluation à plus grande échelle de l'impact énergétique d'une politique de végétalisation, n'est pas possible en réalisant des simulations thermiques dynamiques pour chaque bâtiment. Le degré de détail nécessaire aux modèles de thermiques classiques et la disponibilité des données d'entrées rendent cette approche inadaptée. La modélisation thermique dynamique détaillée sera utilisée comme référence pour valider un modèle simplifié qui représente cependant bien le comportement thermique de l'enveloppe des bâtiments, l'impact des usages des bâtiments, et le couplage (si possible dans les deux sens) avec l'environnement extérieur.

Ce modèle, en cours de développement (doctorat de David Garcia), permet de raisonner sur une typologie des bâtiments (âges, usages, etc.) à adapter aux modifications de l'enveloppe ou de l'environnement végétal. Une modélisation à l'échelle d'un quartier sera alors mise en œuvre afin d'évaluer l'influence de scénarios de végétalisation des bâtiments.

Modélisation du bâtiment dans son environnement (IRSTV / CERMA, LaSIE) :

La thèse de Laurent Malys avait également pour but de mettre en place les modèles permettant d'évaluer l'impact d'un aménagement végétal de quartier sur la consommation énergétique d'un bâtiment.

Un travail de comparaison des résultats de simulation dans le quartier Pin Sec avec les mesures effectuées dans le volet EXPE a été réalisé pour les sols enherbés, le toit et une façade du bâtiment DUNANT sur lequel des mesures de température avaient été réalisées.

Une étude de sensibilité de la prise en compte de phénomènes aérauliques et radiatifs a également été réalisée (Malys et al., 2012). Ainsi, une analyse de l'impact des différents niveaux de prise en compte des flux à la surface extérieure du bâtiment sur ses consommations énergétiques a permis de montrer l'importance d'une bonne représentation des flux radiatifs de grandes longueurs d'onde (Malys, 2012a) (Figure 27).

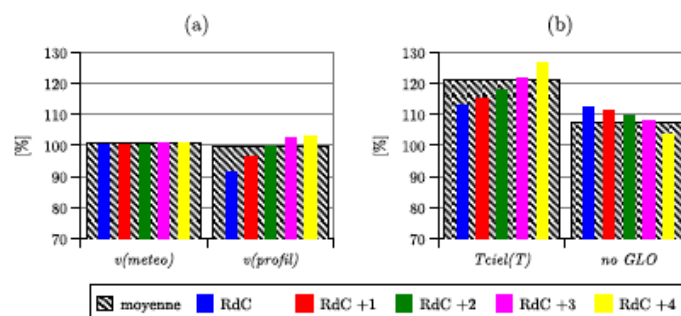


Figure 27 : Consommation de chauffage surfacique moyenne et par étage, par rapport au cas de référence : (a) impact des flux convectifs, (b) impact des flux radiatifs

Modélisation du bâtiment (LaSIE)

Rabah Djedjig a réalisé sa thèse sur financement ANR au LaSIE avec l'objectif principal d'évaluer l'impact de la végétation sur la consommation énergétique des bâtiments. Pour cela des modèles de toitures et de façades végétalisées ont été développés dans TRNSYS (Djedjig et al., 2012) et validés sur la base de l'expérimentation ClimaBAT présentée ci-dessus.

Un module a également été développé dans TRNSYS permettant de représenter l'effet d'insertion du bâtiment dans une rue canyon, et donc de prendre en compte l'effet de confinement urbain (Djedjig, 2013).

Modélisation du quartier (IRSTV / CERMA, LaSIE)

Nous étions partis de l'idée d'utiliser les travaux de la thèse de David Garcia, en cours au GEPEA (entité de l'IRSTV) comme point départ d'une modélisation des consommations énergétiques à l'échelle du quartier. Le retard de cette thèse et son orientation nous ont fait aller vers une autre thèse de l'équipe, avec des objectifs similaires mais une approche plus conforme à nos objectifs, celle d'Adrien Gros au LaSIE (Gros, 2013) dont les travaux ont été très rapidement associés au projet. L'approche développée dans cette thèse consiste à coupler trois types de modèles : une approche simplifiée des phénomènes radiatifs à partir du modèle SOLENE, un modèle aéraulique externe basé sur la description empirique des écoulements autour des bâtiments (QUIC_URB, (Quick Urban & Industrial Complex)) et des modèles de transformée en Z pour représenter les comportement thermique des bâtiments. Le modèle EnviBatE, basé sur cette approche permet de calculer

rapidement la consommation énergétique d'un parc de bâtiments en prenant en compte les actions de l'environnement extérieur et les interactions entre les bâtiments et cet environnement (Figure 28).

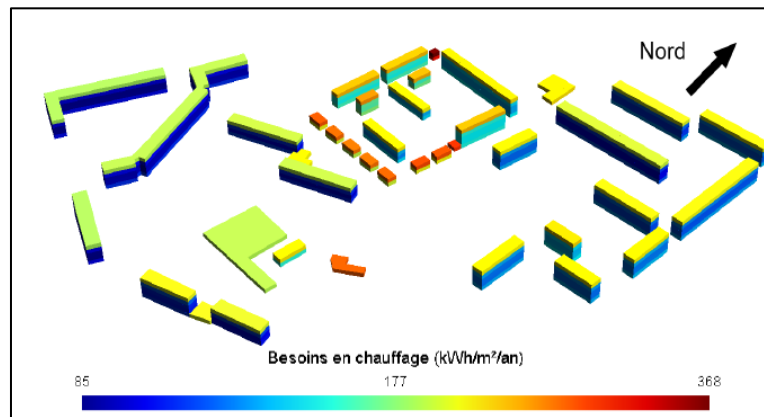


Figure 28 : Evaluation des besoins de chauffage annuels, calculés par étage avec EnviBatE, des bâtiments collectifs du quartier Pin Sec.

MODE 3 – MODELISATION DE L'INFLUENCE DE LA VEGETATION SUR LA CLIMATOLOGIE URBAINE

Description initiale : L'influence de la végétation sur la climatologie urbaine est prise en compte dans les modèles atmosphériques à l'échelle de l'agglomération par le calcul des flux d'évapotranspiration à partir d'un bilan énergétique et hydrique des surfaces. Ces modèles de bilan appliquent à la végétation urbaine les mêmes schémas de fonctionnement qu'en milieu rural. Cependant, dans le cas d'une végétation disposée de façon discontinue à l'intérieur de la canopée urbaine, les modèles de transferts devraient prendre en compte cette grande hétérogénéité des surfaces : couche végétale sur les bâtiments, nature et étendue des couverts végétaux et du sol urbain dont les comportements hydriques diffèrent.

Deux approches de modélisation seront conduites afin d'adapter nos modèles aux spécificités de la végétation et des sols en milieu urbain dans les différentes configurations d'aménagement définies dans le volet TYPO. La première approche met l'accent sur les transferts turbulents entre les surfaces et l'atmosphère à différents niveaux dans la canopée, la seconde a pour ambition de modéliser les échanges canopée-atmosphère et les transferts d'eau dans le sol en interaction avec le réseau hydrologique.

- Dans la première approche de modélisation, la canopée est décrite sur plusieurs niveaux à l'intérieur même d'un modèle atmosphérique, et prise en compte grâce à une approche de type porosité-traînée. Ce type de modélisation, associé à un modèle atmosphérique de simulation des grandes échelles de la turbulence, donne accès aux champs moyens mais surtout, aux champs fluctuants. Cette approche a été introduite dans le modèle atmosphérique des grandes échelles ARPS (Advanced Regional Prediction System, de l'Université d'Oklahoma) pour simuler les écoulements turbulents à l'échelle du paysage rural (Dupont and Brunet, 2008). Le modèle a été validé en conditions thermiques neutres pour des couverts homogènes et hétérogènes (lisière forestière) ainsi qu'en terrain complexe (colline 2D boisée) à partir de mesures in-situ et en soufflerie. Son extension à un ensemble de bâtiments est en cours. Les expériences en soufflerie (EXPE 4) permettront d'évaluer la bonne représentation des interactions dynamiques entre canopées végétales et urbaines, cruciales dans la modélisation des transferts turbulents.

La modélisation proposée ici concerne l'introduction des transferts thermo-hydriques adaptés aux spécificités de la végétation urbaine (parcs, forêts urbaines, revêtements végétaux) dans le modèle de canopée afin de prendre en compte les distributions spatiales, la nature du végétal et des sols. Cette étape de modélisation est nécessaire à l'étude d'impact de la végétation sur le microclimat urbain à l'échelle du quartier et de l'agglomération entière qui sera décrite dans les évaluations.

- La deuxième approche de modélisation consiste à améliorer la plate-forme que Météo-France utilise pour représenter les bilans d'énergie en milieu urbain afin de parvenir à un couplage plus réaliste des bilans thermique et hydrique. La végétation sera explicitement intégrée dans le schéma de ville TEB (Masson, 2000), afin de prendre en compte les effets d'ombrage des bâtiments sur les jardins, et d'inclure la contribution de la végétation dans les échanges turbulents au niveau de la rue. Le sous-

sol sera également introduit dans TEB afin de représenter l'état hydrique du sol urbain en prenant en compte l'influence des écoulements préférentiels et réseaux drainants du sol sur les écoulements latéraux de l'eau.

Une comparaison des deux approches avec les mesures de flux au-dessus de la canopée réalisées dans EXPE permettra d'améliorer la paramétrisation des différents échanges sol/sous-sol/atmosphère.

Travail réalisé :

Approche ARPS (EPHYSE,IRSTV / LHEEA):

Les équipes EPHYSE et LHEEA sont parties de la version du modèle ARPS (multicouches) représentant, par une modélisation de type porosité-traînée, l'influence de la végétation sur la dynamique de l'écoulement. La thèse de (Maché, 2012) effectuée au LHEEA a permis d'adapter ce modèle au milieu urbain, pour les aspects dynamiques et les transferts thermiques entre surfaces urbaines artificielles et l'atmosphère. Sur cette base un important travail de développement a été réalisé dans le code pour y introduire une modélisation des transferts thermodiatifs et hydriques liés à différents aménagements végétaux tels que les murs ou les façades végétales et les arbres présents à l'intérieur de la canopée urbaine (Figure 29). Le détail du modèle est présenté dans (Dupont et al., 2013; Tavares et al., 2014).

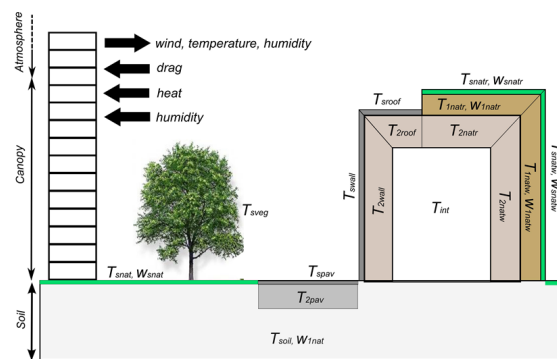


Figure 29 : Représentation schématique de la canopée urbaine en présence de végétation dans ARPS-canopée.

Approche TEB (CNRM / IFSTTAR):

Une partie du travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Cécile de Munck-Lafont (de Munck, 2013) au CNRM, financée en partie sur VegDUD. Son travail a consisté à intégrer dans TEB un modèle de toiture végétale (Figure 30) qui a été validé par rapport aux données du CETE de Nancy (de Munck, 2013; de Munck et al., 2013b).

Le modèle Surfex-TEB a été amélioré pour

- prendre en compte les interactions entre le bâti et la végétation de pleine terre (Lemonsu et al., 2012) (Figure 31) ;
- intégrer un modèle de toiture végétale (Figure 30) : ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Cécile de Munck-Lafont (de Munck, 2013) au CNRM, financée en partie sur VegDUD. Le nouveau modèle de toiture végétale a été validé par rapport aux données du CETE de Nancy (de Munck et al., 2013b) ;
- représenter le sous-sol urbain (Chancibault et al., 2014; de Munck et al., 2013a) (Figure 32) afin de traiter les échanges en eau entre l'atmosphère, la surface, le sol et le réseau d'eau pluviale : ces développements ont été réalisés dans le cadre du post-doctorat de Jean-Marc Brun, en partie financé sur VegDUD.

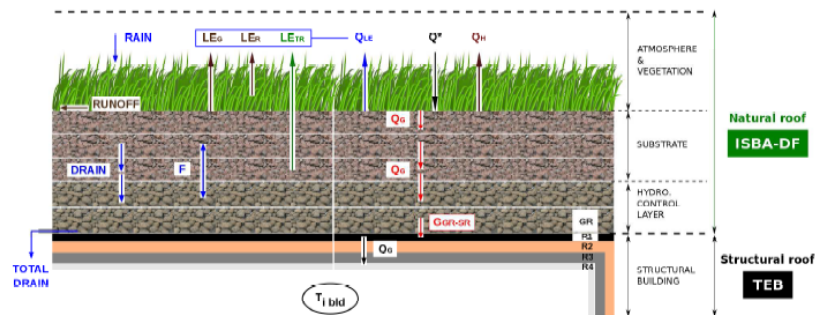


Figure 30 : Structure de toiture végétalisée pour TEB-GREENROOF et processus physiques associés (de Munck et al., 2013a)

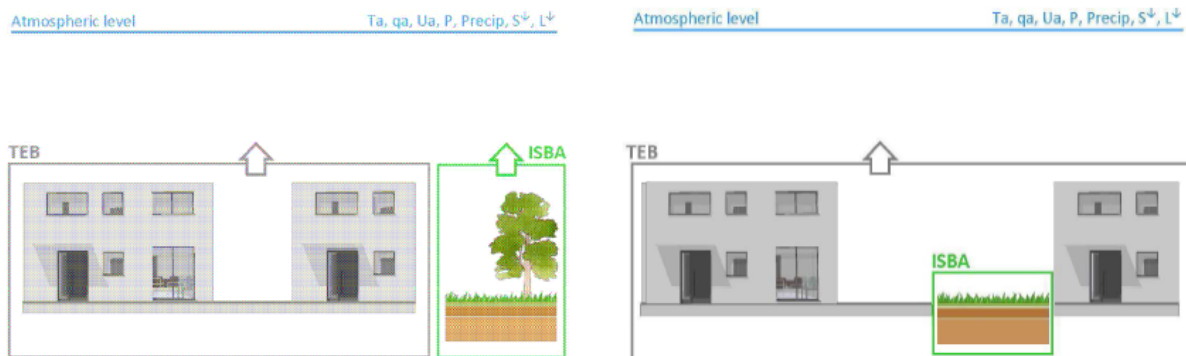


Figure 31 : Gauche : version initiale de TEB sans interaction entre les couverts artificiels et la végétation; Droite : nouvelle version de TEB incluant la végétation dans la rue (de Munck et al., 2013a).

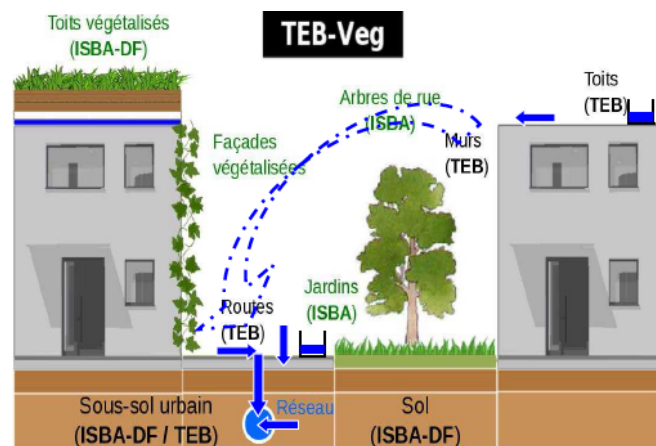


Figure 32 : Schéma synthétisant les différents processus hydriques introduits dans TEB pour chaque compartiment d'une maille : ruissellement de surface (toit et voirie) en réseau, infiltrations parasites, infiltrations des surfaces imperméabilisées, interception sur les surfaces imperméabilisées.

RESULTATS :

- Dans le modèle SOLENE-microclimat (utilisé pour des caractérisations d'ambiances intérieures, extérieures et pour l'évaluation des consommations énergétiques d'un bâtiment en prenant en compte

l'environnement) un module d'enveloppe végétale a été créé. Les résultats du modèle, appliqué au quartier Pin Sec ont été comparés aux mesures, ce qui constitue une validation partielle.

- Un modèle de façade végétale, ainsi qu'un modèle de rue canyon, permettant de prendre en compte l'effet de confinement urbain, ont été développés dans TRNSYS.
- Un nouveau modèle, EnviBatE, qui permet l'évaluation des consommations énergétiques à l'échelle du quartier en prenant en compte les effets microclimatiques a été développé.
- Le modèle TEB a été amélioré afin de prendre en compte les toitures végétales et d'intégrer les interactions sol-bâti-végétation en prenant en compte le cycle de l'eau.
- Le modèle ARPS a été amélioré afin de prendre en compte la dynamique et les transferts (chaleur et humidité) en milieu urbain en présence de végétation.
- Dans le modèle d'acoustique TLM, amélioré pour des calculs plus rapides, a été ajoutée une représentation des façades et toitures végétales.

Le volet MODE a à la fois été lieu d'échange sur les modèles et de décision par rapport à la stratégie d'évaluation. Cette dynamique de travail collectif a renforcé les liens entre les équipes de modélisation thermique et microclimatique et au delà des objectifs du projet VegDUD, celles-ci sont maintenant prêtes à réaliser des imbrications d'échelles :

- utiliser les modèles à petites échelles pour réaliser des analyses de sensibilité utiles pour paramétrer les modèles grandes échelles ;
- utiliser les résultats des modèles à grandes échelles comme conditions aux limites des modèles petites échelles.

L'ensemble des documents disponibles est donné dans [l'ANNEXE 5](#).

A Partir de ce point, nous ne pouvons suivre la trame du projet, car les volets EvalPRIV et EvalCOLL ont été fusionnés. En effet, lors de l'écriture du projet, il nous avait semblé pertinent de séparer l'évaluation de la végétation du domaine collectif (parcs, arbres d'alignement, noues...) de celle du domaine privé (enveloppe du bâtiment, jardin...) car les modes d'action ne sont pas les mêmes : décision des collectivités et possibilité d'action à grande échelle pour l'espace public, réglementations et action diffuse pour l'espace privatif. Dans la pratique du projet, nous nous sommes très rapidement rendu compte qu'en terme d'impact pour la plupart des évaluations, cette division n'avait pas de sens. Aussi, nous présentons ici un seul volet EVAL, fusion des anciens volets.

6. VOLET 5 : EVAL - EVALUATION DES DISPOSITIFS VEGETAUX (M. MUSY, IRSTV/CERMA, AVEC F. RODRIGUEZ, IFSTTAR, E. BOZONNET, LASIE, C. GUTLEBEN, PLANTE & CITE)

OBJECTIFS :

Deux objectifs principaux étaient à atteindre dans ce volet : évaluer les dispositifs végétaux sélectionnés dans TYPO et évaluer les scénarios d'évolution de la place du végétal dans la ville, à différentes échelles. Il s'agissait également de définir les dispositifs à évaluer et les échelles d'évaluation, formaliser les scénarios d'évolution à évaluer et établir une méthode et des critères d'évaluation.

L'effet de la végétation dans les espaces urbains peut être évalué à différentes échelles spatiales et temporelles, et selon différents points de vue scientifiques, qui concernent à la fois les impacts physiques et sensibles. Des outils de modélisation ont été développés dans MODE afin de prendre en compte l'influence de la végétation sur les processus physiques dominants. L'évaluation de l'efficacité de la végétalisation sera appréhendée à l'aide de ces modèles qui permettent d'accéder à un certain nombre de critères physiques (bilan hydrique, consommation énergétique, ambiance sonore) et d'approches adaptées pour les évaluations socio-économiques (effet sur les comportements des individus, bilan économique...).

EVAL 1 – SCENARIOS ALTERNATIFS

Description initiale : Nous produirons des scénarios d'évolution de la ville résultant de l'application à grande échelle de quelques dispositifs végétaux applicables à l'espace privé : mise en pelouse des cœurs d'îlot, séparation par des haies, éléments architecturaux... Ces dispositifs seront sélectionnés à partir des éléments de connaissance obtenus dans TYPO et des résultats des évaluations à l'échelle micro du présent volet. Les outils mis en place dans PHYSIO 3 seront utilisés pour produire les scénarios en partant de l'état actuel de l'agglomération nantaise, de la réglementation (PLU....) et des constats de disparitions et apparitions de types relevés dans TYPO. On pourra par exemple étudier l'effet de la compensation actuelle qui consiste à autoriser une plus grande emprise au sol des bâtiments si on intègre des toitures végétales pour l'infiltration de l'eau, substituant ainsi des surfaces perméables en toitures aux surfaces perméables au sol et reportant les surfaces végétalisées au dessus des espaces de vie des citoyens. Reproduite à grande échelle, une telle tendance est-elle réellement bénéfique pour le microclimat urbain ? Quel est son impact sur les conditions de confort pour les usagers, des bâtiments et des espaces extérieurs ?

Les scénarios ont été décidés dans le volet MODE à partir de 5 dispositifs, des 2 modalités de variations (gestion et répartition) et de l'évolution de la ville.

Au final, seuls 4 dispositifs (arbres, façades et toitures végétales, noues végétalisées, sols enherbés) ont été étudiés car les sols profonds (à opposer au hors sol) ne pouvaient être étudiés que par les modèles hydrologiques. Les scénarios ont été répartis en 4 échelles : le bâtiment, la rue, la quartier (Pin Sec), le secteur nord-est de Nantes.

Les variations formelles étaient différentes selon les échelles :

- A l'échelle de la rue : nous avons fait varier le rapport de forme de la rue et son orientation.
 - o En acoustique, nous sommes partis d'une rue canyon de 12m de large avec des bâtiments de 5 étages (17m), le rez-de-chaussée étant plus haut (Figure 33). Le rapport de forme (H/L) est donc égal à 1,42. L'orientation n'a pas d'importance.
 - o Pour les évaluations énergétiques, le rapport de forme (H/L) a été conservé fixe, égale à 1. L'orientation a varié : NS, EO, NE-SO et NO-SE.

- Pour les évaluations du confort thermique, les largeurs et hauteur de rues ont été : H=14m L=14m (H/L=1), H=21m L=14m (H/W=1,5), H=21m L=21m (H/L=1). Trois orientations ont été étudiées : NS, EW, NE-SO.

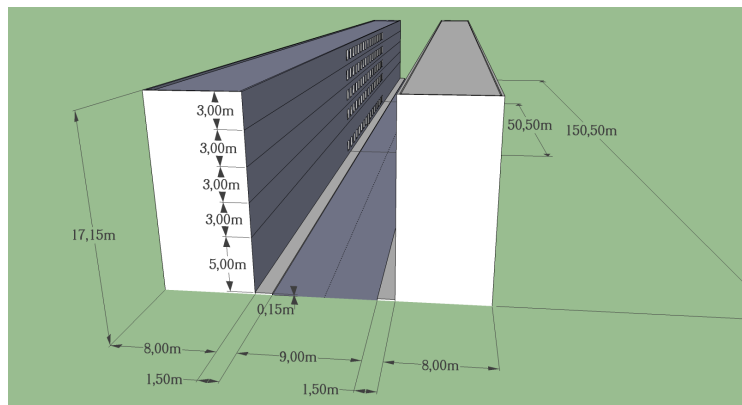


Figure 33 : Profil de la rue canyon étudiée en acoustique

- A l'échelle du quartier, nous avons réalisé une densification « à la main », à partir des résultats de PHYSIO 3 qui ne produit que des types d'îlot et de densité. Il n'y a pas de projet sur ce quartier et il est difficile de faire une densification automatique sur un quartier réel.

Un travail spécifique a été fait lors du stage de Karina Azos (Azos, 2011).

- A l'échelle de la ville, les scénarios produits en PHYSIO n'ont finalement pas pu être appliqués à toutes les échelles et nous nous sommes rendus compte que pour les appliquer, il faudrait que le modèle d'évolution produise des typologies complètes d'îlots, avec des caractéristiques formelles (arrangement des bâtiments, ou rugosité, densités frontales...) et techniques (caractéristiques thermiques, nature des sols...). Il y a là un travail important supplémentaire à réaliser qui n'avait pas été prévu dans VegDUD. Il devrait l'être dans le projet ANR MAPUCE.

Les variations d'entretien et de distributions sont essentiellement prises en compte par la quantité et de la répartition du végétal. La Figure 34 représente schématiquement les répartitions étudiées pour les influences sur les consommations énergétiques et le confort à l'échelle de la rue.

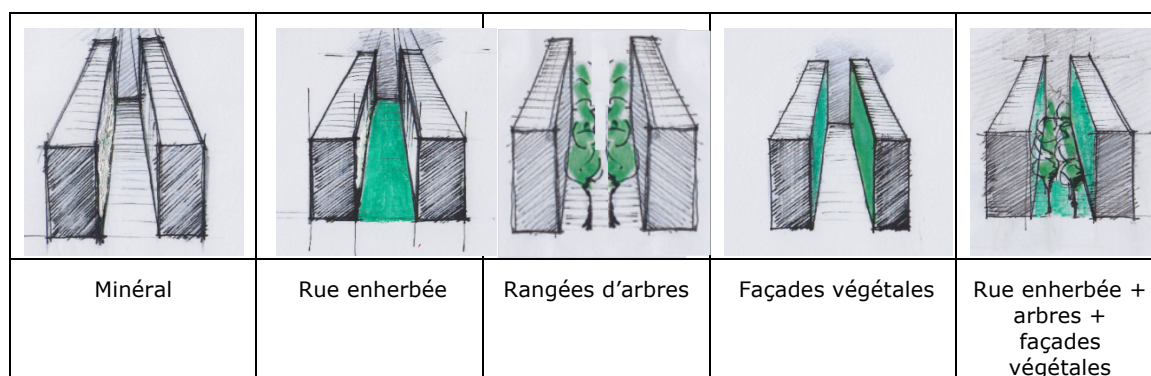


Figure 34 : Représentation schématique des répartitions étudiées pour les influences sur les consommations énergétiques et le confort à l'échelle de la rue.

EVAL 2 – INFLUENCE CLIMATOLOGIQUE

Description initiale : Les transferts d'énergie entre les bâtiments, le sol et l'atmosphère (la canopée urbaine) conditionnent la microclimatologie urbaine et la gestion de l'eau en ville. Ces transferts s'effectuent sous différentes formes : flux de chaleur sensible et de chaleur latente entre les surfaces (dont les surfaces végétales) et l'air environnant, apports solaires, échanges radiatifs entre les surfaces. La présence de la végétation influe sur l'ensemble de ces transferts, de manière différente selon les types de végétaux, la position des surfaces... Cette influence peut être caractérisée à différentes échelles : à l'échelle locale, pour des applications liées aux ambiances ou à la

consommation énergétique des bâtiments, à l'échelle du quartier et de l'agglomération pour la climatologie et la gestion d'équipements urbains.

Pour la quantification du rôle des dispositifs végétaux relevant du domaine privé, nous chercherons à appréhender d'une manière fine leurs impacts thermo-radiatifs, hydriques et aérauliques sur les microclimats et à expliciter l'influence de la composition urbaine sur ces impacts (différences en fonction de l'orientation, de la proximité d'obstacles...). Pour cela, nous procéderons à des simulations de configurations types dans lesquelles nous ferons varier les types de végétation en utilisant les modèles affinés dans MODE 1.

Les modèles meso-échelle développés dans MODE 3 nous permettront d'évaluer l'impact des scénarios proposés sur le phénomène d'îlot de chaleur. Les résultats seront utilisés pour mesurer l'impact indirect des dispositifs sur la consommation énergétique des bâtiments (EvalPRIV 3).

Description initiale EvalCOLL2: L'étape de modélisation proposée dans MODE 3 permet l'introduction dans le modèle de canopée étendu au milieu urbain, des transferts thermo-hydriques adaptés aux spécificités de la végétation urbaine (parcs, forêts urbaines, revêtements végétaux). L'impact de la végétation sur le microclimat urbain sera étudié à l'échelle du quartier et de l'agglomération entière, en examinant les distributions spatiales de la température de l'air et de l'humidité. Il s'agit par exemple de déterminer s'il est préférable pour le microclimat urbain de développer une végétation dispersée dans la ville ou de la concentrer sur des pôles (parcs, forêts urbaines).

Travail réalisé :

ARPS

L'évaluation de l'impact de différents dispositifs végétaux sur le microclimat urbain (température principalement) a été réalisée, dans le cadre du post-doctorat de Richard Tavares au LHEEA (Tavares et al., 2014) avec le modèle ARPS pour des scénarios de tissu urbain homogène (incluant ou non la végétation) et des scénarios pouvant correspondre à des forêts urbaines. Les scénarios simulés ont été choisis volontairement très contrastés pour permettre d'identifier les dispositifs végétaux potentiellement les plus efficaces dans un objectif de régulation du microclimat .

- Pour les forêts urbaines ou les parcs, la référence choisie est le cas d'un sol nu sans végétation. Couvrir le sol de végétation basse (75% de pelouse) permet d'abaisser la température de l'air à 2 m (au-dessus du sol) de 2°C au maximum pendant la journée. En revanche, l'introduction des arbres au-dessus de la pelouse induit jusqu'à 6°C de réduction supplémentaire. Le rafraîchissement de l'air dans les différents scénarios végétalisés est intimement lié à la capacité de réchauffement de la surface. En l'absence d'arbres, la température de surface de la pelouse (par rapport au sol nu) est réduite en raison d'un accroissement du processus d'évapotranspiration ; en présence d'arbres, c'est l'ombrage qui, pris en compte par une atténuation du rayonnement net, a pour effet de réduire le réchauffement de la surface.

- Pour le tissu urbain homogène, la référence est une canopée urbaine dont la surface est occupée à 25% par des bâtiments de 20m de haut, le reste étant couvert de surfaces artificielles. Les effets d'ombrage sont pris en compte mais la température de l'air varie peu avec la hauteur à l'intérieur de la canopée (moins de 2°C), avec un réchauffement plus rapide au niveau des toits. Lorsque des arbres (22 m) sont intégrés au tissu urbain, l'ombrage des toits, des façades et du sol entraîne une diminution de la température de l'air, de façon d'autant plus prononcée que l'on se rapproche du sol. En l'absence d'arbres mais en recouvrant 50% des bâtiments avec de la végétation (en façade et sur les toits), l'air est rafraîchi de 5°C au maximum dans la canopée et cette baisse de température est mise en évidence dans l'après-midi et la nuit. En début de journée, au contraire, nos enveloppes végétales ont tendance à stocker moins de chaleur que les matériaux artificiels de la simulation de référence et à se réchauffer plus rapidement, conduisant à une température de l'air plus élevée de 1°C. Enfin en présence d'arbres, les enveloppes végétales de bâtiments ont peu d'effet rafraîchissant, voire même un effet négatif par rapport que celui obtenu en présence de murs artificiels et d'arbres.

Cette étude de sensibilité met en avant un point crucial qui est la modélisation des phénomènes d'ombrage par les arbres sur les bâtiments. Nos résultats semblent en accord qualitatif avec les simulations à l'échelle de la rue mais une analyse complémentaire sur la prise en compte de l'ombrage sur les murs reste nécessaire car les écarts de température sur la hauteur de la canopée semblent surestimés.

TEB

On utilise ici la plateforme de modélisation des surfaces continentales SURFEX, qui intègre notamment le modèle de canopée urbaine TEB (incluant les améliorations apportées dans le volet MODE3) et le modèle de végétation ISBA.

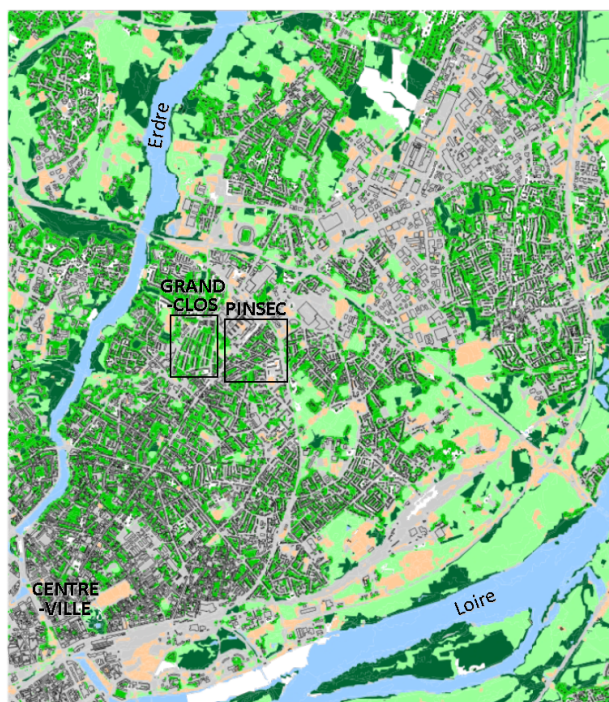


Figure 35 : Zone d'étude pour la modélisation de climatologie et hydrologie urbaines. Les rectangles indiquent les deux zones de la campagne expérimentale

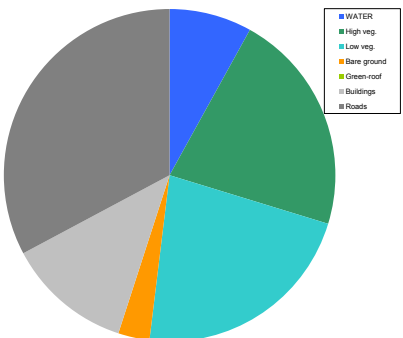
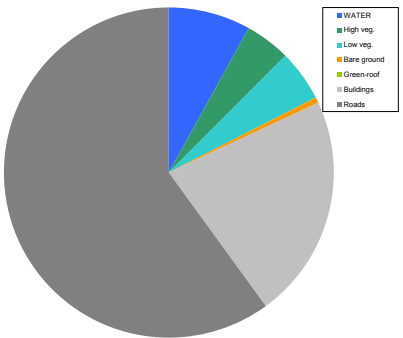
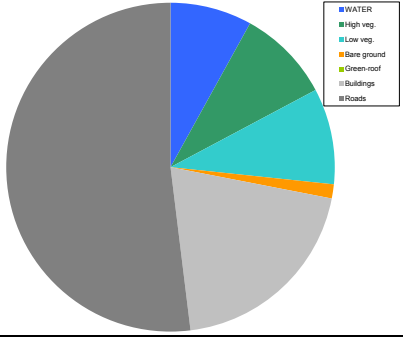
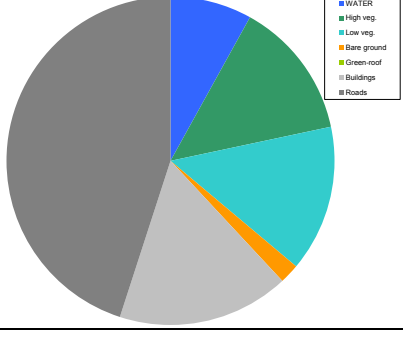
Le domaine de simulation couvre une zone assez large de 6.4 km d'ouest en est par 7.2 km du nord au sud (soit 32 points par 36 points avec une résolution horizontale de 200 m (Figure 35)). La période de simulation dure 2 ans et 5 mois, à partir du 1^{er} mai 2010. Une période de chauffe de 1 an est imposée au modèle, de sorte que seuls les 17 derniers mois sont analysés. Compte tenu des contraintes de calculs numériques, le modèle est appliqué en mode forcé, i.e. les conditions météorologiques (rayonnement, vent, température, humidité) au-dessus de la ville sont prescrites. Ces forçages météorologiques (évoluant au pas de temps horaire) sont construits à partir des observations de la station opérationnelle de l'aéroport Nantes-Bouguenais et sont appliquées de façon homogène sur l'ensemble du domaine d'étude. Les données pluies observées dans le cadre de l'ONEVU (bassin versant du Pin Sec) ont été utilisées.

Le modèle fournit un ensemble de sorties, au pas de temps horaire et en tout point du domaine, en particulier :

- des variables météorologiques comme la température et l'humidité de l'air près de la surface, les températures de surface et du sol, les flux d'énergie en surface.
- Des variables hydrologiques comme les contenus en eau du sol, les différentes contributions au ruissellement dans les réseaux (ruissellement de surface, infiltration parasite de l'eau du sol), l'évapotranspiration des sols naturels, imperméabilisés et de la végétation...
- Des variables additionnelles telles que la consommation d'énergie des bâtiments (diagnostiquée grâce au module d'énergétique du bâtiment activé dans TEB), et les indices de confort (universal thermal climate index, UTCI) calculés par TEB dans les rues et dans les bâtiments

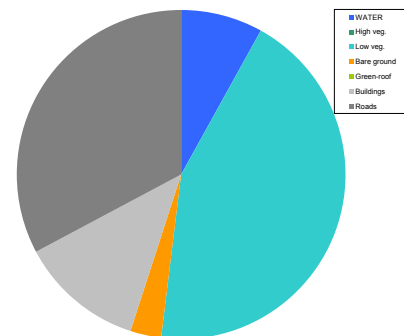
Les données d'occupation du sol, nécessaires à l'initialisation des modèles physiques, sont produites à l'aide de données satellites (Spot5, résolution à 10m, 23 mai 2004), de la base de données BDTOPO® (2008) et de la banque de données urbaines de Nantes Métropole (2008). Les caractéristiques des bâtiments (types de matériaux et propriétés thermo-radiatives, équipements en chauffage) sont déterminées en classifiant chaque point du domaine étudié selon une typologie de bâtiments (centre-ville, bâtiments collectifs, bâtiments individuels, ...) et une typologie d'usages (logement, bureaux, zones commerciales, agricoles...) auxquelles sont associées des tables de correspondances de paramètres descriptifs. Ceci constitue le scénario de référence (REF).

Afin d'évaluer l'impact de stratégies de végétalisation, cinq scénarios ont été construits et comparés au scénario REF ainsi qu'entre eux (listés dans le Tableau 3). Comme le site d'étude a déjà une fraction de la surface naturelle élevée, les scénarios de végétalisation se concentrent sur une réduction de la végétation plutôt qu'une augmentation, sauf dans le scénario TVE, où l'implantation de toitures végétalisées sur certains bâtiments (services publics, commerciaux, collectifs) entraîne une augmentation de la fraction moyenne de la surface naturelle de 8%.

Nom	Définition	Caractéristiques
REF	Scénario de référence ou « cas réel » - 48 % de surfaces naturelles (dont 3 % de sol nu)	
GRD10	Réduction homogène de la proportion d'espaces verts par rapport au cas de référence : 10 % de surfaces naturelles dans le domaine	
GRD20	Réduction homogène de la proportion d'espaces verts par rapport au cas de référence : 10 % de surfaces naturelles dans le domaine	
GRD30	Réduction homogène de la proportion d'espaces verts par rapport au cas de référence : 10 % de surfaces naturelles dans le domaine	

NOTREE

Même occupation du sol pour les espaces verts du cas de référence mais les arbres sont remplacés par de la végétation basse (type pelouse)



TVE

Implémentation de toitures végétalisées, selon le type du bâtiment majoritaire pas maille. Tous les bâtiments d'une maille sont végétalisés

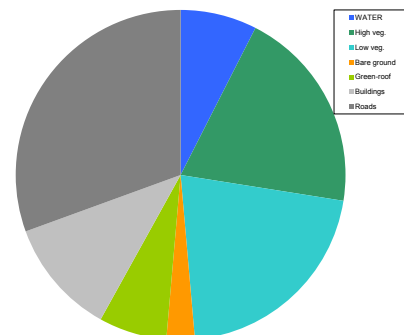


Tableau 3 : Description des scénarios simulés avec SURFEX(TEB)

Les stratégies de végétalisation sont souvent envisagées pour améliorer le confort thermique en période estivale grâce à un effet de refroidissement de l'air ambiant lié à l'évapotranspiration de la végétation. Par conséquent, on s'intéresse ici, dans un premier temps, à l'impact des scénarios sur l'îlot de chaleur urbain (ICU) en été. La journée du 20 août 2012 a été sélectionnée car il s'agit de la journée la plus ensoleillée et chaude de la période avec des températures supérieures à 30°C en milieu de journée.

Les températures – moyennées sur les heures de jour et les heures de nuit – sont tracées le long d'un axe allant du sud-ouest (partant du centre-ville) vers le nord-est du domaine, et cela pour tous les scénarios (Figure 36).

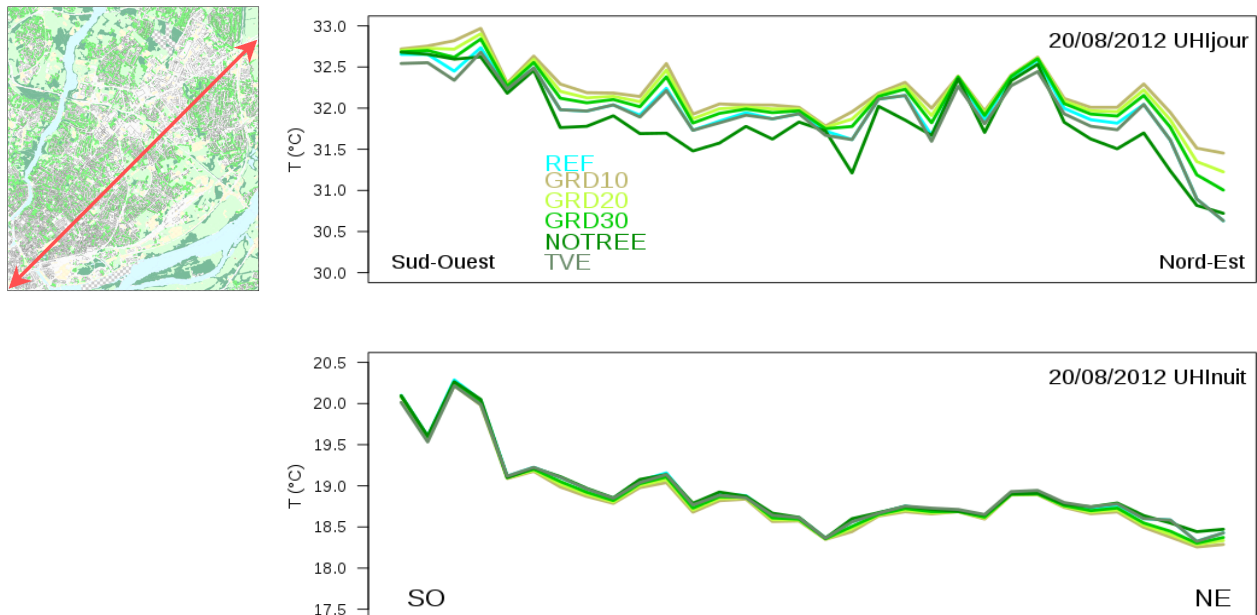


Figure 36 : Température de l'air à 2 m simulée le 20 août 2012 en milieu de journée (en haut) et en milieu de nuit (en bas), pour les différents scénarios, le long d'un axe traversant le domaine d'étude du sud-ouest vers le nord-est.

- Le cas REF montre qu'il existe une différence de température significative entre le centre-ville et le nord-est du domaine : de l'ordre de 1.5°C aussi bien le jour que la nuit.
- La comparaison des scénarios montre un léger effet de rafraîchissement liée à la végétalisation : jusqu'à 1°C de différence entre le scénario GARDEN10 (10 % d'espaces verts) et le scénario GARDEN30.
- L'effet de rafraîchissement le plus important reste atteint avec le scénario TVE correspondant à l'implantation de toitures végétalisées.

La suite des résultats de cette analyse est présentée en Eval 3 pour les impacts énergétiques en en Eval 5 pour les impacts sur le confort thermique.

EVAL 3 – INFLUENCE ENERGETIQUE

Description initiale EvalPRIV2: Nous traiterons dans un premier temps ici de l'effet direct des dispositifs végétaux (arbres, façades végétales, toitures vertes, pelouses dans les jardins) sur la consommation énergétique d'un bâtiment. L'évaluation reposera sur des simulations thermiques dynamiques réalisées pour des bâtiments de différents types. En effet, l'impact de solutions végétales dépend très fortement du climat, du mode constructif du bâtiment et de son usage (Akbari et al., 1997; Huang et al., 1990). Il s'agira donc d'explorer à la fois l'impact sur des bâtiments anciens rénovés que sur des bâtiments répondant à la prochaine réglementation thermique. Nous répondrons au préalable à des questions stratégiques sur les types de plantation, les dispositions sur l'enveloppe (masques sur les parois opaques, vitrées, toitures ou façades).

L'évaluation à macro-échelle (quartier) consistera à prendre, pour des périodes caractéristiques (été et hiver) les résultats d'influence de la végétation sur le climat obtenus dans EvaPRIV 2, et les intégrer ici en rebouclage sur l'impact sur la consommation énergétique. Nous distinguerons ainsi effets directs et indirects.

Description initiale EvalCOLL2: L'impact d'une politique de végétalisation de la ville sur la consommation énergétique d'un quartier sera quantifié. A cette échelle, il est nécessaire de faire une évaluation qui prenne en compte les différents types de bâtiments dans leurs proportions et leur contexte économique et social, d'envisager l'évolution du tissu urbain (démolition, construction, rénovation). En utilisant les résultats de EvalPRIV 2, sur un quartier choisi pour sa représentativité

en terme de potentiel d'évolution, et par rapport à la documentation disponible, nous mettons en place une évaluation énergétique d'une végétalisation quasi-systématique des espaces collectifs.

Travail réalisé :

Echelle du bâtiment : façades végétales

Il s'agissait dans un premier temps d'évaluer les impacts directs des toitures et façades végétales sur les consommations énergétiques d'un bâtiment. L'expérimentation a montré qu'en hiver, la baisse des gains solaires liée à l'écran formé par les façades était inférieure à la réduction des déperditions, limitée par l'ajout du complexe de la façade. Le bilan hivernal est finalement peu modifié (Figure 37). L'été, les gains solaires sont fortement réduits, les pertes nocturnes également, mais au final, le bilan qui était positif sans façade végétale (entrée de chaleur dans le bâtiment) devient négatif.

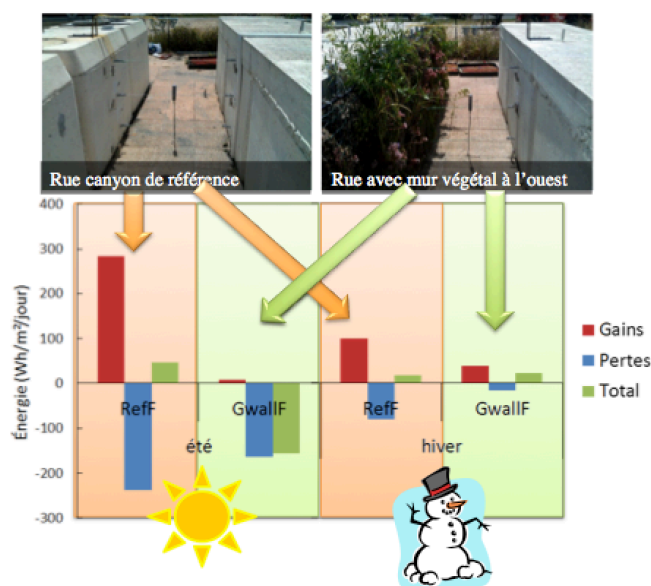


Figure 37: Impact de la façade végétale sur le bâtiment échelle réduite dans ClimatBat

Des simulations à l'aide du modèle développé dans TRNSYS ont permis de séparer les impacts directs des impacts indirects. Pour cela, le bâtiment a été simulé isolé puis inséré entre deux bâtiments similaires, également recouverts d'une façade végétale. Les résultats ont montré que si les façades végétales permettaient une réduction des consommations énergétiques d'été de 33%, cette réduction atteignait 37% dans la situation dense pour laquelle la consommation de référence (sans façade végétale) est augmentée (Figure 38). Il est important de noter que la bâtiment simulé ne comporte pas d'isolation thermique.

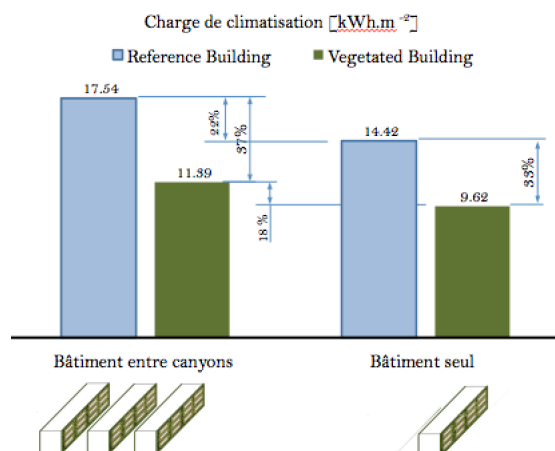


Figure 38: Résultats de simulation d'un bâtiment en situation isolée ou entouré de bâtiments identiques.

Echelle de la rue

A l'échelle de la rue, une étude de sensibilité a été réalisée avec SOLENE-microclimat afin d'identifier les situations dans lesquelles les différents dispositifs végétalisés ont une influence sur les besoins de climatisation des bâtiments. Les dispositifs végétalisés étudiés sont : les toitures végétalisées, les façades végétalisées, les surfaces enherbées et les arbres. Ces différentes situations envisagées concernent le type de bâti. En effet, selon le type de bâtiment considéré, l'influence des divers dispositifs végétalisés peut fortement varier.

La rue étudiée est une rue de 14 m de largeur et 14 m de hauteur. Pour l'impact énergétique, on étudie le tronçon central de bâtiment (Figure 39).

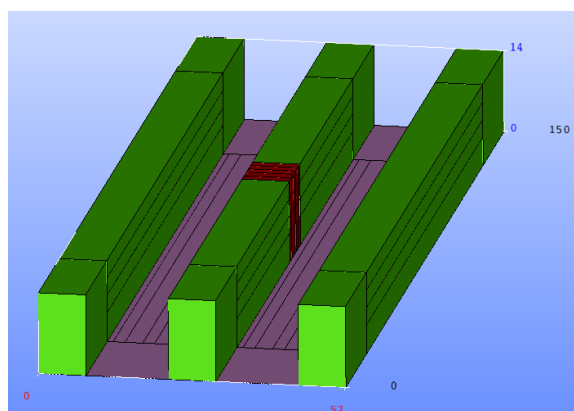


Figure 39: Géométrie étudiée pour l'évaluation énergétique à l'échelle de la rue

Les façades végétalisées sont étudiées via leur influence directe lorsqu'elles sont installées sur le bâtiment d'étude mais aussi via leur influence indirectes lorsqu'elles sont mises en place sur un bâtiment avoisinant le bâtiment d'étude. Afin de réduire le nombre de combinaison et donc réduire le nombre de simulation à réaliser, les toitures et les façades végétalisées implantées sur le bâtiment d'étude ne constituent qu'une seule modalité. L'influence de ces dispositifs est évaluée pour différents types de bâtiment : isolé, ou non isolé, faiblement ou fortement vitré. Enfin, diverses orientations pour la rue seront considérées. Le Tableau 4 donne l'ensemble des modalités étudiées.

	Critères	Nombre de modalités	Modalité
Végétal	Toiture/Façade (bâtiment étudié)	2	100% végétal / 100% minéral
	Rue	2	100% végétal / 100% minéral
	Arbre	2	Avec / Sans
	Façade (bâtiment avoisinant)	2	100% végétal / 100% minéral
Bati	Isolation	2	Isolé / Non isolé
	Vitrage	2	20 % vitré / 60 % vitré
Géométrie	Orientation	3	0° / 45° / 90°

Tableau 4 : Critères et modalités de l'étude de sensibilité

L'étude conclut que la végétalisation du bâtiment étudié (façades et toitures végétales) est la mesure qui permet de réaliser les plus fortes économies d'énergie à l'exception d'une application sur un bâtiment fortement vitré, situation dans laquelle les arbres modifient le plus les consommations énergétiques. La végétalisation de la rue a une influence significative que dans des situations où le bâtiment étudié est vitré. Leurs influences restent malgré tout faibles et c'est en l'absence d'arbres et de végétalisation du bâtiment d'étude que le potentiel de réduction des consommations énergétiques sera maximum. L'orientation de la rue ne modifie pas la hiérarchisation des influences des dispositifs végétalisés. Enfin les effets de second ordre sont la plupart du temps négligeables. S'il arrive qu'ils ne le soient pas, alors c'est qu'ils mettent en jeu les arbres. L'ensemble de ce bilan est résumé dans le Tableau 5.

Non Vitré Non Isolé	Non Vitré Isolé	Vitré Non Isolé	Vitré Isolé
1. Bâtiment végétalisé	1. Bâtiment végétalisé	1. Bâtiment végétalisé	1. Arbre
2. Arbre	2. Arbre	1. Arbre	2. Bâtiment végétalisé
x	x	3. Rue végétalisée	3. Rue végétalisée
x	x	4. Bâtiment ext végétalisé	4. Bâtiment ext végétalisé

Tableau 5 : Bilan des configurations dans lesquelles les dispositifs ont une influence sensible sur les consommations énergétiques.

Dans un second temps, une étude plus détaillée de chacun des dispositifs a mis en évidence une relation de linéarité entre le pourcentage de végétalisation des rues (ou des façades avoisinant le bâtiment étudié) et le pourcentage d'économie d'énergie induit. Cette étude a également montré que la végétalisation des toitures est la disposition qui présente la plus grande efficacité avec la mise en place d'arbre dans les rues dans la course à la réduction des consommations d'énergie. Enfin, la végétalisation des façades du bâtiment est bien plus efficace pour les étages supérieurs et, dans certaines situations, il peut même s'avérer être complètement inutile de végétaliser les bas étages du point de vue des consommations énergétiques.

Echelle du quartier

Toujours avec SOLENE-microclimat, dans sa thèse, Laurent Malys (Malys, 2012b) a étudié les effets des toitures et façades végétales des surfaces au sol enherbées, sur le confort dans un bâtiment de 5 étages du quartier Pin Sec densifié, le bâtiment Dunant sur lequel les mesures ont été faites. Deux configurations ont été testées : bâtiment isolé ou non, et différentes stratégies de végétalisation, en positionnant successivement, des surfaces végétales sur le bâtiment et son environnement (Figure 40a et Figure 40b).

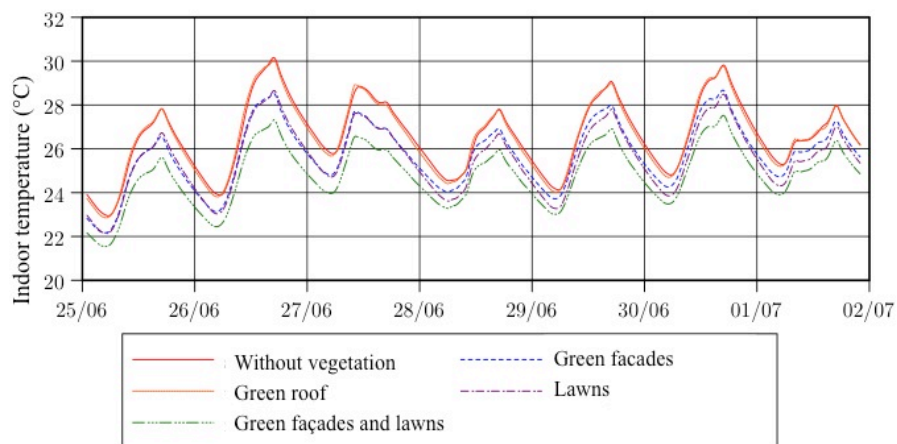
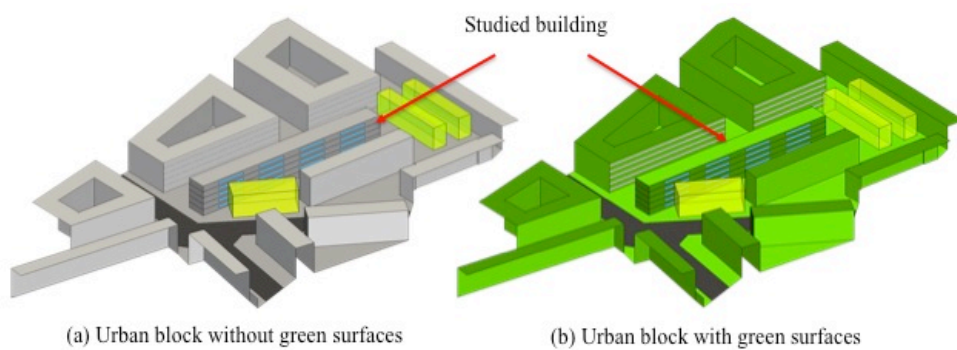
Il montre que les toitures végétales ont essentiellement un effet direct sur les bâtiments sur lesquels elles sont installées. Cet effet est essentiellement vérifié au niveau de l'étage supérieur, du fait de l'ombrage des plantes. Trois étages plus bas, l'effet n'est plus visible (Figure 40c). L'effet indirect des toitures végétales est également très faible en raison de leur impact très limité sur la température de l'air dans le quartier.

Les pelouses ont un effet indirect sur les bâtiments environnants car elles contribuent à entourer le bâtiment par un environnement radiatif moins chaud.

Les façades végétales ont des effets directs et indirects. Des simulations complémentaires ont été réalisées pour les distinguer (Figure 40d) et on montre que l'effet direct est supérieur du fait de l'effet d'ombrage des feuilles, alors que l'effet indirect, met essentiellement en jeu les effets radiatifs, et une sollicitation inférieure due au fait que les bâtiments végétalisés environnant émettent moins de rayonnement infrarouge. Cet effet n'est significatif que quand les bâtiment étudié n'est pas lui aussi couvert de façades végétales.

Un autre résultat important est que les températures intérieures sont principalement modifiées pour les bâtiments non isolés. Dans le cas de bâtiments bien isolés, les effets directs des enveloppes végétales sont très faibles (Figure 40d).

Par ailleurs les besoins en eau pour irriguer les façades végétales ont été estimés et ils dépassent la quantité d'eau de pluie qui peut être interceptée sur les toits.



(c) Indoor temperature in the second floor of the central building – Non insulated building

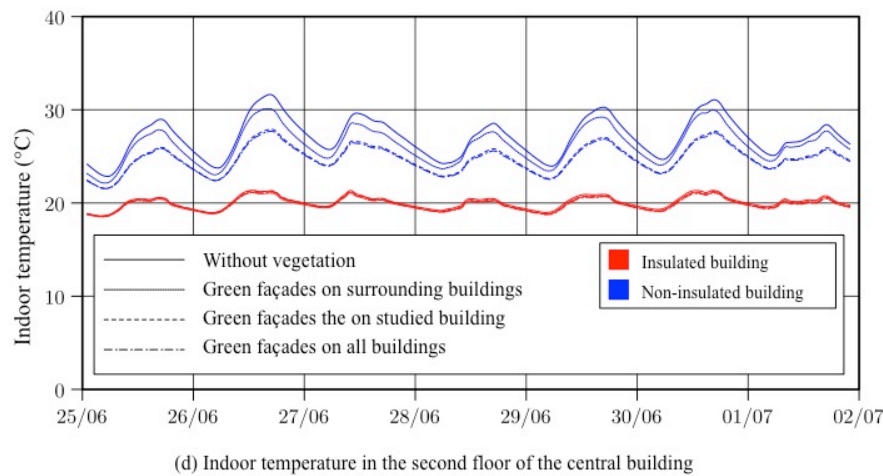


Figure 40 : Bâtiment étudié dans le quartier densifié. Les deux cas extrêmes sont représentés : (a) cas minéral (b), cas avec des surfaces végétales sur les murs, les toits et les sols; (c) impact des toitures et façades, végétales, des sols enherbés sur la température intérieure du second étage du bâtiment ; (c) impact des façades végétales sur la température intérieure du second étage du bâtiment (Malys, 2012b).

Une autre évaluation à l'échelle du quartier a été réalisée, à l'aide du modèle développé par Adrien Gros, EnviBatE. Dans cette simulation, les toitures et sols ont été entièrement végétalisés. La représente les réductions de besoins en climatisation apportées par cette stratégie de végétalisation. Dans la Figure 41, on constate que la réduction est plus importante proportionnellement dans les étages inférieurs en raison de besoins qui étaient déjà très faibles. Par ailleurs, on remarque que même si on ne considère que les derniers étages, il y a une grande variation des résultats. En effet, les bâtiments centraux bénéficient de l'effet de confinement et les températures d'air extérieur y sont légèrement inférieures.

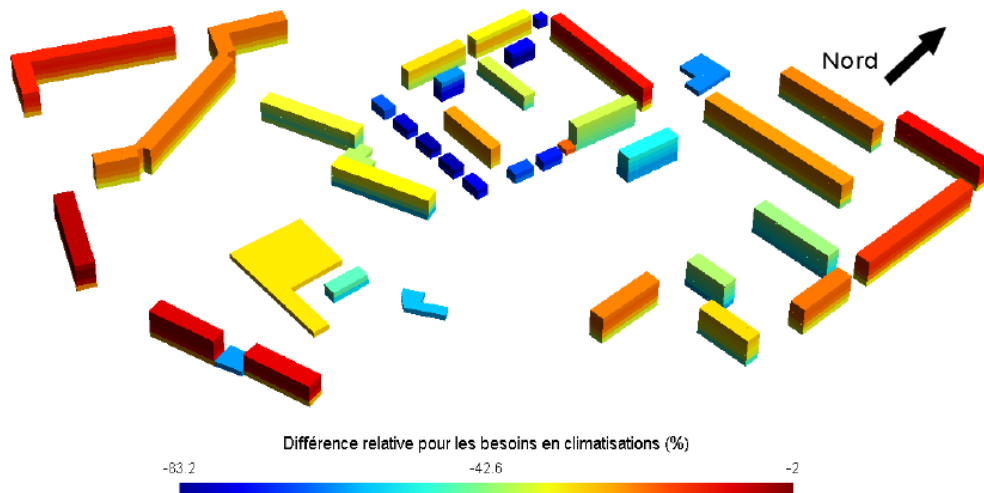


Figure 41 : Effet des toitures végétales et sols enherbés : réduction des besoins de climatisation

Echelle de la ville

La méthodologie de simulation est celle donnée en Eval 2. Le modèle TEM-BEM calcule à chaque pas de temps la consommation d'énergie liée à l'usage du chauffage pour une température de consigne dans les bâtiment fixée à 19°C. Cette consommation d'énergie est cumulée spatialement pour calculer la consommation totale de la zone urbaine étudiée, et cumulée dans le temps à l'échelle annuelle, et à l'échelle saisonnière. Les résultats

sont comparés entre scénarios pour évaluer la surconsommation ou l'économie d'énergie permise par chaque scénario par rapport au cas de référence (Tableau 6).

	Economie d'énergie (%) par rapport à REF				
	GRD10	GRD20	GRD30	NOTREE	TVE
Année	-0.10	-0.05	-0.17	-1.03	-5.61
Hiver	-0.15	-0.09	-0.04	-0.58	-5.23
Printemps	-0.34	-0.20	-0.10	-3.19	-5.21
Eté	+0.14	+0.13	-0.33	-0.95	-6.84

Tableau 6 : Récapitulatif des variations annuelles et saisonnières de consommation d'énergie pour le chauffage calculées en comparant des cinq scénarios au cas de référence.

La consommation d'énergie annuelle, pour l'usage du chauffage exclusivement, cumulée sur le domaine d'étude (46km²) est de 1108 GW h.

La comparaison des scénarios montre que l'impact majoritaire est lié à l'implantation des toitures végétalisées, qui isolent thermiquement les bâtiments, ce qui donne lieu à une économie d'énergie de l'ordre de 5 % par rapport à REF.

Logiquement, cet effet des toitures végétalisées (correspondant à une meilleure isolation thermique du bâtiment) est surtout bénéfique sur les points de grille occupés par du logement de type collectif, plutôt que par du logement individuel, car c'est sur ces bâtiments que sont implantées les toitures végétalisées.

Les autres scénarios montrent des effets marginaux.

EVAL 4 – INFLUENCE HYDROLOGIQUE

Description initiale EvalPRIV4: Dans ce volet, l'évaluation ne sera réalisée qu'à une échelle locale, avec l'étude de dispositifs à l'échelle de la parcelle cadastrale. Comme pour le volet EvalCOLL 4 l'évaluation portera sur les modifications du bilan hydrique par les dispositifs de végétalisation, avec le modèle URBS.

Description initiale EvalCOLL4: Ce travail sera mené à 2 échelles, et l'évaluation portera sur l'influence de la végétalisation sur les termes du bilan hydrique en milieu urbain (répartition des précipitations en ruissellement, évaporation et infiltration) et sur l'état hydrique du sol. L'évaluation sera tout d'abord menée à l'échelle locale, à partir de certaines techniques alternatives représentatives. Le modèle URBS sera utilisé pour cette échelle locale et les conditions microclimatiques seront déterminées à partir des modélisations réalisées à une échelle plus grande (EvalCOLL 3 et MODE3). Le suivi expérimental local mis en œuvre dans EXPE (instrumentation d'une noue ou d'un bassin d'infiltration végétalisé sur la ZAC Bottière Chênaie) servira d'étude de cas. Ensuite, l'évaluation sera également menée à l'échelle de l'agglomération, en s'appuyant sur la modélisation SURFEX (contenant le schéma de ville TEB). L'effet de certains scénarios alternatifs sera testé à cette échelle, comme l'efficacité de plantations d'arbres (arbres d'alignement ou forêt urbaine), ou une systématisation des techniques de rétention et d'infiltration d'eau sur les lotissements (noues et bassins d'infiltration).

Travail réalisé :

Deux approches des impacts de la végétation sur le cycle de l'eau ont été réalisées. La première repose sur le modèle URBS (ifsttar) et la seconde sur le couplage Hydro-climatique TEB-ISBA (CNRM et Ifsttar).

Approche URBS, échelle du bassin versant

L'évaluation de l'influence hydrologique de la végétation a été menée en s'appuyant sur les simulations réalisées à deux échelles : l'échelle du quartier à travers le modèle hydrologique URBS et l'échelle de l'agglomération, ou d'une partie de l'agglomération, à travers le modèle TEB-Hydro.

A partir des dispositifs végétalisés définis dans le volet MODE, l'évaluation s'est faite à partir de scénarios basés sur l'introduction des dispositifs de gestion à la source des eaux pluviales impliquant la végétation (toitures végétalisées, noues) et sur les scénarios de végétalisation impliquant les arbres ou les surfaces enherbées (Tableau 7).

<i>Dispositif</i>	Echelle du quartier Modèle URBS	Echelle de l'agglomération Modèle Surfex-TEB
<i>D1 = végétation enveloppant les bâtiments (toitures et façades végétalisées)</i>	Toitures végétalisées	Toitures végétalisées
<i>D2 = techniques alternatives de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal</i>	Noues végétalisées	
<i>D3 = surfaces enherbées vs surfaces sans couvert végétal</i>		Surfaces enherbées
<i>D4 = végétation de pleine terre vs hors sol</i>		
<i>D5 = arbres</i>	Plantation d'arbres dans les rues	Plantation d'arbres

Tableau 7 : Dispositifs de végétalisation de la ville testés

L'étude de cas qui a servi de support à l'évaluation est le quartier urbain du Pin sec et en particulier le bassin versant du même nom sur lequel le dispositif d'observation hydrologique et météorologique est déployé (description dans le volet EXPE). Les caractéristiques morphologiques de ce bassin sont connues grâce aux données géographiques disponibles et issues de la DIG de Nantes Métropole (parcelles, rues, bâtiments) et de données collectées dans le volet PHYSIO pour la végétation. Ces données indiquent que sur la surface du bassin versant (31 ha) la surface arborée du bassin couvre 18 %, la surface bâtie 17 % et la surface des rues 23 %, et 11 % de surface revêtue autre que des bâtiments et de la rue. Sur ce bassin versant urbain, les simulations hydrologiques ont été réalisées à l'aide du modèle URBS (Rodriguez et al., 2008), un modèle hydrologique distribué capable de simuler le bilan hydrologique à l'échelle de la parcelle cadastrale ou à l'échelle du quartier et de représenter le transfert de l'eau pluviale le long du réseau hydrographique pour simuler le débit à l'exutoire. L'année 2010 a été choisie comme base de la simulation, et pour cette année, les données d'entrée au modèle ont été utilisées : la pluie issue des observations pluviométriques disponibles sur le bassin versant (pluviomètre de Dunant), l'évapotranspiration potentielle (ETP Penman-Monteith) déduite des données Météo-France issues de la station météorologique de Bouguenais. Les paramètres physiques utiles à la mise en œuvre du modèle ont été déduits de mesures in situ (caractéristiques de sol) ou de données déduites de la littérature (Rodriguez et al., 2008) utilisées pour le bassin versant voisin des Gohards. Les données de débit observées à l'exutoire du réseau d'eau pluviale du Pin sec ont servi à valider le modèle pour la période de simulation choisie. Les simulations ont été réalisées au pas de temps de 5 minutes, et l'analyse des résultats a été faite en utilisant des critères de comparaison classiquement utilisés en hydrologie : le critère de biais et le coefficient de détermination, estimés sur les hauteurs ruisselées de l'ensemble des événements pluvieux de l'année. Les résultats obtenus sur la configuration actuelle du quartier du Pin sec montrent que le modèle reproduit correctement les débits ruisselés à l'exutoire du bassin versant (Figure 42) ; le bilan hydrologique du bassin versant (Figure 43) montre que la pluie annuelle génère autant de ruissellement de surface (31%) que d'infiltration d'eau du sol dans les réseaux (32%), et que la part de l'évapotranspiration représente quasiment la moitié de la pluie annuelle sur ce bassin versant urbain mais dont la surface végétalisée est importante.

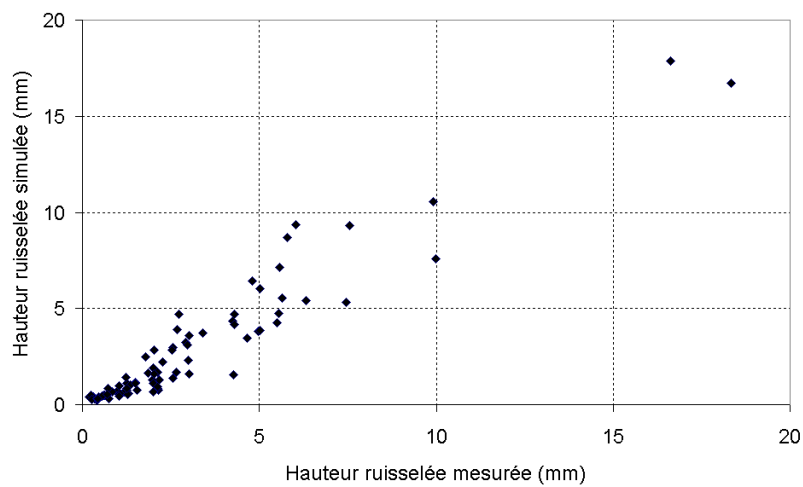


Figure 42 : Comparaison des quantités d'eau ruisselées sur le bassin versant du Pin sec pour l'année 2010, simulations réalisées avec le modèle URBS (configuration initiale) et mesures dans le réseau d'eau pluviale - Critères de comparaison - $R^2=93\%$ et $\text{Biais} = -0.06$.

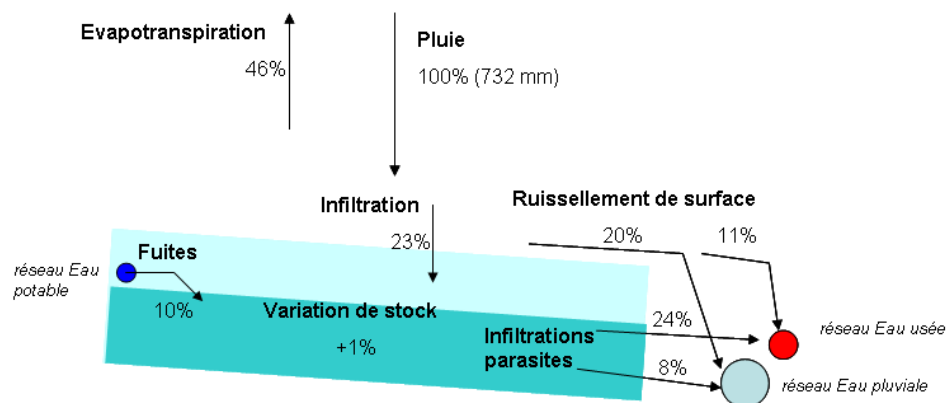


Figure 43 : Bilan hydrologique simulé avec le modèle URBS sur l'année 2010 ; les contributions sont indiquées en pourcentage de la pluie annuelle du bassin versant. La contribution liée aux fuites du réseau d'eau potable est estimée de façon individuelle à partir de la connaissance de l'indice de perte linéaire du réseau (Nantes Métropole 2012).

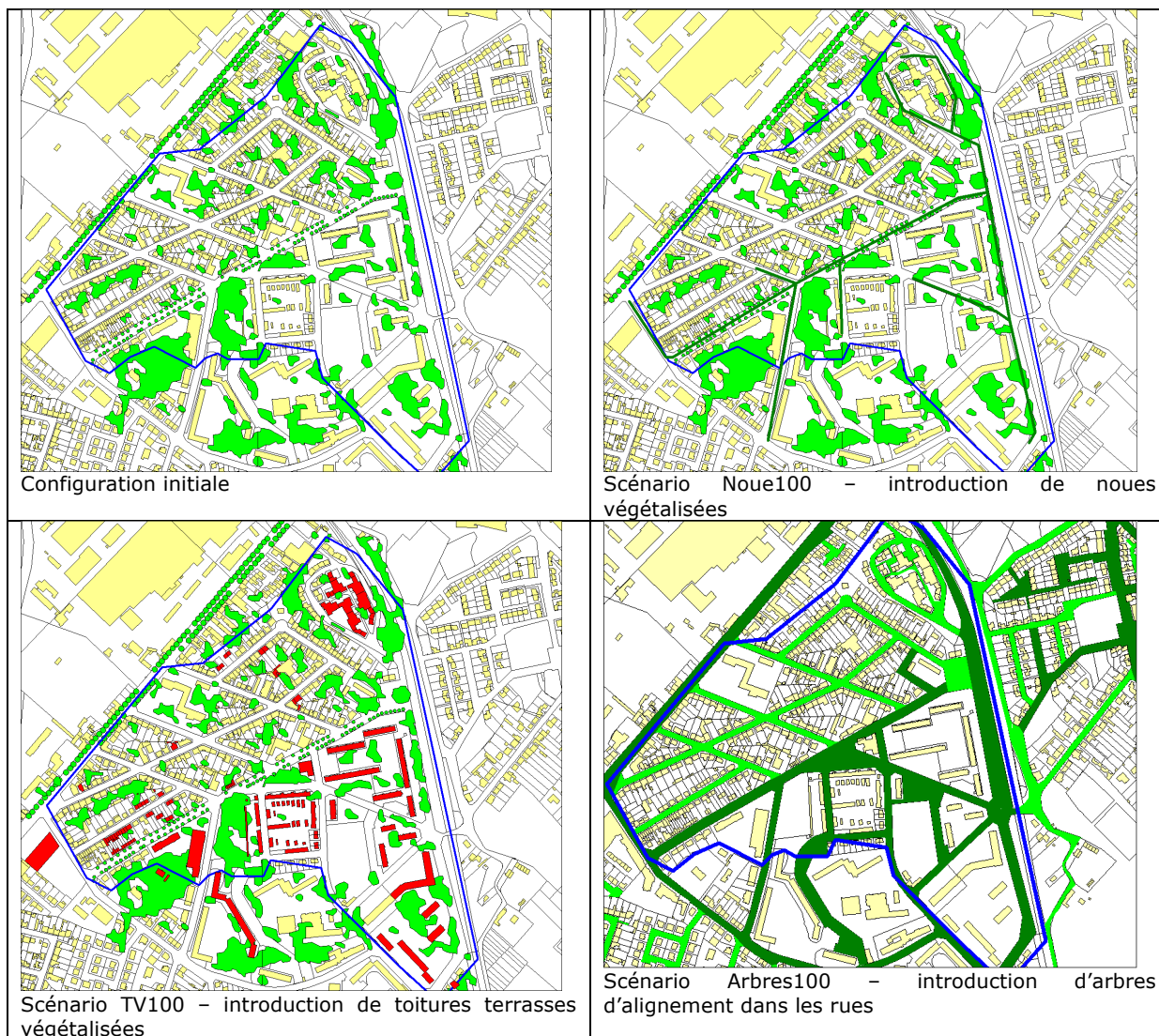


Figure 44 : Bassin versant du Pin sec et scénarios de végétalisation

Trois scénarios de végétalisation ont été testés à partir de cette configuration initiale : introduction de toitures végétalisées sur les toitures terrasse, remplacement du réseau d'eau pluviale (branches principales) par des noues végétalisées, plantation d'arbres d'alignement dans les rues (Tableau 8). L'idée maîtresse de ces scénarios consiste à réaliser des aménagements de la ville réalistes pour chaque dispositif (par exemple on ne végétalise que les toitures terrasses et non pas les toits en pente). Par conséquent, la végétalisation (en terme de quantité de végétation apportée par chaque dispositif) du quartier n'est pas forcément homogène entre les scénarios, ce qui rend difficile leur comparaison directe en terme de sensibilité. Toutefois, cette méthodologie permet de comparer des options réelles et utilisées par les aménageurs.

	Configuration initiale	Configuration végétalisée	Caractéristiques du dispositif testé
Toitures végétalisées	Surface bâtie : 17 % Surface toitures terrasse : 8 %	TV50 - 50 % des toitures terrasse végétalisées TV100 - 100 % des toitures terrasse végétalisées	Substrat de 15cm et végétation de type sedum+gazon
Noues végétalisées	Surface de voirie : 23 % Longueur du réseau d'eau pluviale 3.9 km	Noues50 - Longueur du réseau de noues= 1.2 km Noues100 - Longueur du réseau de noues = 2.4 km	Noue engazonnée de 2m de large
Arbres d'alignement de rue	Proportion de Surface d'arbres sur la voirie par rapport à la surface du bassin versant $S_{voie}^{arbres} = 3.5 \%$	Arbres0: $S_{voie}^{arbres} : 0 \%$ Arbres50 $S_{voie}^{arbres} : 4 \%$ Arbres100: $S_{voie}^{arbres} : 8 \%$ 2 rangs d'arbre dans les rues dont la largeur dépasse 12m, et 1 rang d'arbre dans les autres	Arbres dont le houppier occupe une surface de 0.9 m ² /ml de voirie

Tableau 8 : Caractéristiques des scénarios de végétalisation

Les résultats des scénarios ont été interprétés en termes de modification du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant. Les variables examinées dans ce bilan hydrologique sont spécifiquement le volume correspondant au débit restitué (volume « ruisselé ») à l'exutoire du réseau d'eau pluviale, et l'évapotranspiration. Le volume ruisselé est considéré égal à la somme des contributions des différents types d'occupation du sol (bati, voirie, sol non revêtu) et de la contribution du sol au débit liées aux infiltrations d'eau du sol dans les réseaux enterrés. L'évapotranspiration est la somme de l'évaporation de l'eau disponible à la surface du sol et de la transpiration de l'eau du sol par les racines. L'impact des scénarios sur ces deux variables a été étudié à l'échelle annuelle. L'analyse des résultats illustre l'effet des dispositifs végétalisés sur le bilan hydrologique : de façon générale, les dispositifs permettent de réduire le volume ruisselé produit à l'exutoire du bassin et de favoriser l'évapotranspiration (Figure 45). Les impacts les plus importants sont obtenus par les noues pour ce qui concerne la réduction du volume ruisselé : l'infiltration de l'eau dans la noue, qui remplace un simple transfert de l'eau pluviale dans un réseau enterré, permet de limiter les volumes d'eau générés pendant les événements pluvieux. Cette infiltration est évidemment possible si le sol sous-jacent a une capacité d'infiltration suffisante, ce qui est le cas pour l'étude de cas abordée dans ce travail. L'effet des toitures végétalisées est également notable, en particulier en ce qui concerne l'évapotranspiration ; dans ce cas, c'est surtout l'évaporation de l'eau stockée en surface ou dans le substrat de la toiture qui est modifiée. Enfin, il peut être observé que la plantation d'arbres d'alignement dans les rues est le scénario qui modifie le moins le bilan hydrologique ; ce résultat est sans doute lié à la faible proportion de végétation « rajoutée » dans ce scénario.

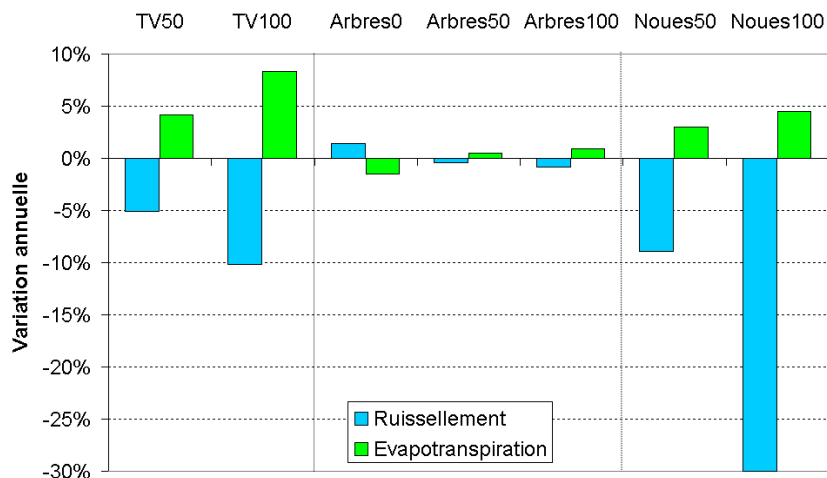


Figure 45 : Impact des scénarios de végétalisation du quartier du Pin sec sur le bilan hydrique. Variations annuelles du volume ruisselé produit à l'exutoire du bassin versant et de l'évapotranspiration générée par les surfaces.

Approche TEB – ISBA, échelle grand quartier

L'impact de la végétation sur le cycle de l'eau peut être étudié selon deux points de vue : le rafraîchissement de l'air ou la gestion des eaux pluviales. Dans le premier cas, le flux de chaleur latente dont la variation peut induire une modification de la température de l'air peut être analysé. Dans le deuxième cas, le volume d'eau ruisselé est un paramètre à étudié.

A l'échelle d'un secteur de ville, la plateforme de modélisation SURFEX (TEB (MODE3) et ISBA) est utilisée selon la configuration et les scénarios décrits dans EVAL2 (Influence climatologique) à l'échelle d'un secteur de ville. Le ruissellement de surface ainsi que le flux de chaleur latente ont été cumulés sur toute la période analysée (17 mois) et sur tout le domaine pour chaque scénario et comparé à la simulation de référence.

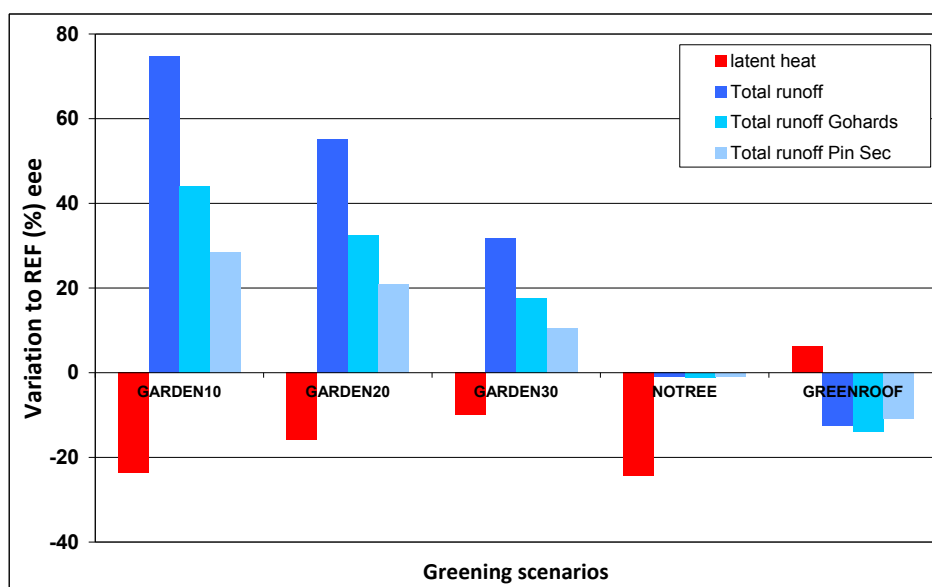


Figure 46 : Ecart (%) entre chaque scénario et l'état actuel (REF) pour le ruissellement de surface (bleu) et la chaleur latente (rouge) à l'échelle de tout le domaine d'étude

Comme attendu, la fraction de végétation a un impact direct sur le volume d'eau ruisselé : la diminution de part de végétation augmente le volume d'eau ruisselé. Ainsi, le scénario ayant le plus gros impact sur le ruissellement de surface est GRD10.

Le type de végétation (haute ou basse) ne semble pas avoir d'impact sur le volume d'eau ruisselé (NOTREE) en revanche, la végétation haute a un impact fort sur le flux de chaleur latente.

Les toitures végétalisées diminuent de façon importante le ruissellement de surface.

Deux scénarios ont un fort impact sur le flux de chaleur latente : GRD10 et NOTREE.

Les toitures végétalisées contribuent à l'augmentation du flux de chaleur latente.

TEB- ISBA, échelle du bassin versant

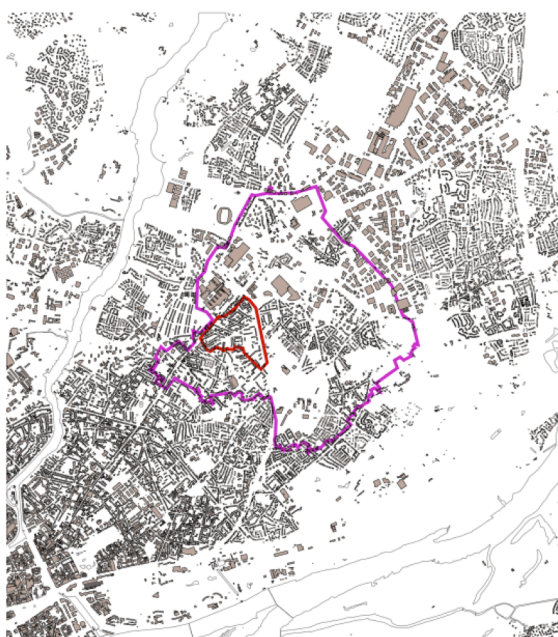


Figure 47 : Limites des bassins versants du Pin Sec (rouge) et des Grands Gohards (fushia) sur le domaine de simulation - Bassin du Pin Sec (31 ha) et des Gohards (513 ha)

La fraction de surfaces naturelles à l'échelle du bassin du Pin Sec est de 28 % et des Gohards (Figure 47) de 37.5%. Elles sont donc inférieures à celles du domaine (48%).

L'impact de la végétation est lié à la fraction initiale de surfaces naturelles : l'augmentation du volume d'eau ruisselé des scénarios GRD** est moindre pour les Gohards et le Pin Sec.

Synthèse

Les résultats obtenus à l'échelle du quartier ou à l'échelle d'une partie de l'agglomération avec deux modèles différents montrent des tendances similaires vis-à-vis de l'introduction de végétation dans la ville. Le bilan hydrologique est modifié par les dispositifs végétalisés : le ruissellement est réduit lorsque ces dispositifs sont introduits, et l'évapotranspiration est augmentée. L'influence de scénarios faisant apparaître ou disparaître des arbres dans la ville semble moins importante sur le bilan hydrologique que des scénarios de verdissement des surfaces revêtues ou de scénarios favorisant l'introduction de techniques de gestion à la source des eaux pluviales comme les toitures ou les noues végétalisées.

EVAL 5 – INFLUENCE SUR LES AMBIANCES

Description initiale EvalPRIV5: La présence du végétal doit également être envisagée à partir des ambiances qu'elle offre pour les pratiques dans de multiples situations. Deux approches complémentaires seront mises en œuvre : par l'entrée «physique» des ambiances et par l'entrée «sensible». La première qui permet de mesurer l'impact du végétal sur les facteurs d'ambiance sera complétée par une approche de terrain qui met en évidence, au delà de ces facteurs, le potentiel de génération d'ambiance que peut présenter le végétal.

Approche physique

Les outils numériques de caractérisation des niveaux sonores en milieu extérieur bâti permettront d'évaluer l'impact des différents scénarios de pratiques alternatives, notamment liées à l'enveloppe du bâtiment. Ces simulations seront complétées par des campagnes expérimentales ponctuelles in-situ afin d'évaluer directement l'impact acoustique de telles pratiques expérimentales pour l'utilisateur dans la rue, et de quantifier les déterminants des phénomènes physiques mis en jeu. Ces informations serviront de données d'entrée pour la modélisation acoustique des scénarios.

L'utilisation de surfaces végétales (ou de volumes) modifie les différents facteurs physiques d'ambiance : température, vitesse, humidité de l'air, température des parois... Partant de ces facteurs, obtenus à l'aide du modèle développé dans MODE 1, nous qualifierons le confort thermique à l'aide des modèles de confort extérieur proposés dans la bibliographie (Robitu, 2005) afin d'évaluer la modification des ambiances liée à la présence de différents dispositifs végétaux.

Approche sensible

La densification de la ville générera une proximité plus grande entre les constructions et les citadins, des proxémies sensibles (Balaÿ, 1986 ; Balaÿ et al., 2007). Le rôle du végétal dans l'expérience de cette proxémie future mérite d'être mieux connu aujourd'hui pour être mieux anticipé demain. Nous partirons de situations végétales du domaine du privé (jardins, patios, bâtiments) relevées dans TYPO 2. Puis nous élaborerons des éléments de connaissance sur l'expérience sensible vécue dans ces situations, depuis l'espace extérieur et depuis l'intérieur, en distinguant des temporalités saisonnières différentes, par exemple l'hiver, l'été, etc. Cette phase permettra de saisir comment un artiste, un architecte peut « regarder à nouveau » le végétal dans la perspective d'un développement équitable de la ville dense dans laquelle il agit.

Description initiale EvalCOLL5: Ce volet sera abordé sous l'angle physique en traitant l'ambiance acoustique d'une part et sous l'angle sensible, avec une démarche in situ dans des configurations végétales particulières. L'approche sensible s'appliquera uniquement à petite échelle.

Approche physique

L'influence des pratiques alternatives de végétalisation pour les espaces collectifs (resp. privés dans PRIV 6) sur l'ambiance acoustique se fera à travers des indicateurs classiques tels que les niveaux sonores (SPL) et les temps de réverbération (TR). Ces études pourront être menées à différentes échelles spatiales, depuis l'échelle de la rue aménagée jusqu'à celle des rues adjacentes, à partir des codes numériques développés au LCPC (volet MODE 1).

Approche sensible

Pour imaginer une stratégie de développement durable avec le végétal dans une ville dense, la dimension esthétique ne doit pas être occultée. Elle peut être envisagée à partir de l'expérience sensible que des configurations végétales offrent dans le vécu ordinaire, à partir des phénomènes sonores, visuels, olfactifs et thermiques générés depuis des situations perceptives multiples. L'histoire de la perception dans la conception paysagère nous enseigne que c'est l'expérience visuelle offerte au promeneur, qui a souvent été l'attention des concepteurs ou des analystes. Les vis-à-vis, la propagation sonore, la densité autour d'une placette, tout ceci contribuera à des conditions d'existence où les « distances » sensibles seront à l'épreuve plus tard comme elles le sont aujourd'hui. Pour des terrains sélectionnés dans TYPO 2 pour leur capacité à offrir réellement ou potentiellement des « paysages » générateurs d'ambiances locales depuis des situations de réception plurielles, nous élaborerons des éléments de connaissance sur l'expérience sensible vécue depuis ces situations, en distinguant les situations proches, les situations lointaines, ainsi que des temporalités saisonnières différentes.

Approche physique :

Acoustique :

Des scénarios ont été conçus afin de quantifier l'impact de différents revêtements végétaux en termes d'ambiances sonores, en utilisant le modèle TLM présenté en MODE. Ils consistent à appliquer des propriétés acoustiques représentatives de couvertures végétales sur les façades et/ou les toits des bâtiments de la rue, de la configuration de référence pour laquelle l'ensemble des façades et des toits des bâtiments sont parfaitement réfléchissants, au cas extrême où l'ensemble de ces surfaces sont végétalisées (Gauvreau *et al.*, 2012). Par ailleurs, pour l'ensemble des scénarios, la chaussée, les trottoirs ainsi que le rez-de-chaussée des façades des bâtiments sont considérés comme rigides.

Les surfaces végétalisées sont modélisées par une condition d'impédance. Ainsi, les valeurs moyennes de la résistance spécifique au passage de l'air évaluées expérimentalement sont utilisées comme paramètre d'entrée du modèle d'impédance : $\sigma_F = 60 \text{ kN.s.m}^{-4}$ pour les façades et à $\sigma_R = 400 \text{ kN.s.m}^{-4}$ pour les toits végétalisés. Les parois « rigides » sont caractérisées par un coefficient de réflexion en pression unitaire.

Les résultats de simulation de ces scénarios ont fait l'objet d'intercomparaisons en termes de niveaux de pression acoustique et de temps de décroissance sonore.

Les cartographies des niveaux de pression sonore continus équivalents intégrés sur une durée de 2 s ($L_{eq,2s}$ @ 100 Hz) sont présentées à la Figure 48 dans le cas des scénarios extrêmes : cas sans végétation et cas pour lequel les quatre étages et le toit des deux bâtiments sont végétalisés. L'effet de la végétation est notable dès le premier étage des façades sur toute la largeur de la rue : pour une fréquence de 100 Hz un gain de l'ordre de 5 dB est observé entre ces deux scénarios.

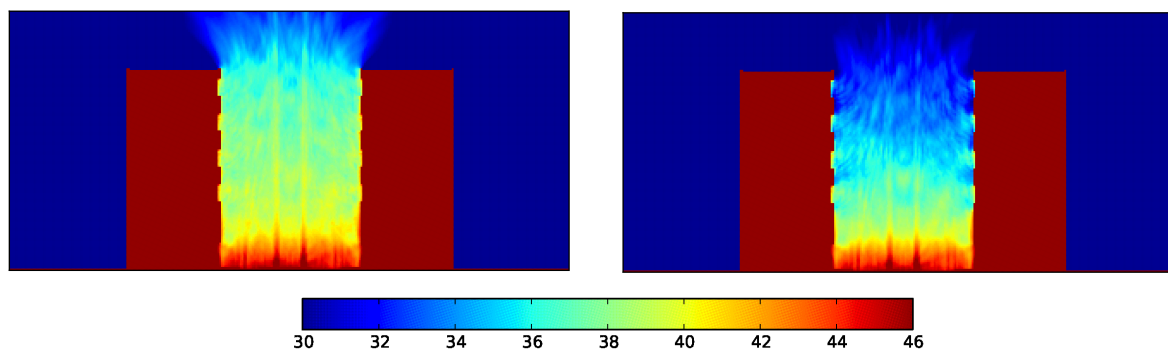


Figure 48 : Niveaux de pression sonore continus équivalents à 100 Hz en dB pour, à gauche, toutes les surfaces parfaitement réfléchissantes, et à droite, les 4 premiers étages ainsi que les toitures des 2 bâtiments végétalisés.

En faisant varier le taux de recouvrement des façades et la localisation de la couverture végétale sur le bâti, les résultats montrent l'impact notable de la répartition du végétal sur les niveaux acoustiques et les temps de décroissance sonore, à l'intérieur comme à l'extérieur de la rue. En particulier, la végétalisation des toitures n'a d'impact en-dehors de la rue que sur les niveaux sonores et non sur les temps de décroissance sonore. Ceci souligne l'importance du choix des indicateurs utilisés pour caractériser un environnement sonore. L'ensemble des résultats est donné dans le rapport de post-doctorat de Gwenaél Guillaume (Gauvreau *et al.*, 2012).

Confort thermique

Echelle de la rue

Les évaluations concernant le confort thermique à l'échelle de la rue ont été réalisées dans le cadre du post-doc d'Agota Szucs à l'IRSTV. Les configurations simulées sont celles présentées dans la Figure 34.

Cinq variantes ont été traitées :

- MIN : rue sans végétation et entièrement couverte de surfaces minérales ;
- LAWN : seul le sol est végétal, couvert de pelouse ;
- TREE : rue contenant 2 rangées d'arbres de 9 m de haut ;
- GREENFAC : murs de la rue couverts de façades végétales ;

- VEG : rue entièrement couverte de pelouse au sol, contenant 2 rangées d'arbres de 9m et dont les murs sont couverts de façades végétales.

Les simulations avec SOLENE-microclimat ont permis d'évaluer les températures de surface, les écoulements d'air, la température de l'air, l'humidité et la température radiante moyenne. Le confort est analysé en utilisant l'index UTCI (Weihs et al., 2012).

Pour chaque cas, les valeurs ont été calculées à 16h pour une journée chaude à Nantes, le 8 juillet 2010, à la hauteur des piétons, le long d'un axe transversal.

Pour une journée d'été, dans le cas de la rue orientée Nord-Sud, la rue entière est exposée au rayonnement solaire direct, alors que dans le cas de la rue orientée Est-Ouest, la façade sud de la rue est ombragée.

Il en résulte que les profils de température de l'air sont plus hétérogènes dans le cas de la rue orientée Est-Ouest. La Figure 49 restitue les profils obtenus pour cette rue et dans les Tableau 9 et Tableau 10 est donnée une synthèse des température d'air calculées à 2 m et des index UTCI calculés sur chaque trottoir.

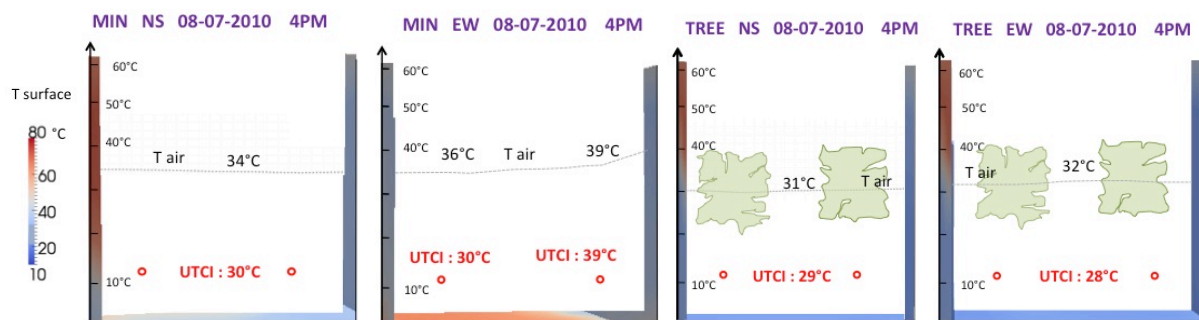


Figure 49 : Résultats pour les cas MIN et TREE pour les deux orientations de rue (Est-Ouest et Nord-Sud)

	MIN	LAWN	TREE	GREENFAC	VEG
NS	34	32	31	30-32	27
EO	36-40	26-28	32	33-37	29
NE-SO	36	29	32	31-34	28

Tableau 9 : Plage de variation de la température de l'air à 16h le 8 juillet 2010, pour la rue de hauteur 14 m et de largeur 14 m. Une seule valeur, pas de variation dans la largeur de la rue.

	MIN	LAWN	TREE	GREENFAC	VEG
NS	30-30	28-28	29-29	27-30	25-25
EO	30-39	22-25	28-28	27-33	24-24
NE-SO	35-37	28-30	28-28	29-32	26-26

Tableau 10 : Valeur de l'UTCI à 16h le 8 juillet 2010, pour la rue de hauteur 14 m et de largeur 14 m. Les deux valeurs correspondent aux deux côtés de la rue. Dans l'échelle UTCI, vert = pas de stress thermique, jaune = stress thermique modéré, orange = stress thermique fort.

Toutes les valeurs sont données dans des [planches \(Szucs, 2013\)](#).

Echelle de la ville :

La méthodologie de simulation est celle expliquée en Eval2 (TEB).

Les conditions de confort sont évaluées dans les rues (en prenant l'UTCI calculé à l'ombre exclusivement), en se concentrant sur la période estivale avec un focus sur le mois d'août 2012.

L'UTCI est calculé en chaque point de grille et agrégé spatialement en pondérant par rapport à la superficie de plancher de façon à attribuer plus de poids aux zones les plus peuplées (faute d'information sur la répartition

spatiale de la population sur le domaine). Cette agrégation spatiale est faite à l'échelle de tout le domaine (ALL) mais aussi en dissociant les types de bâtiments : les logements individuels (IND), collectifs (COL), et les bâtiments de bureaux (BUR), sachant qu'ils n'ont pas tous les mêmes caractéristiques constructives.

On représente jour par jour l'évolution journalière (au pas de temps horaire) des valeurs d'UTCI pour le confort extérieur, tout d'abord pour le scénario de référence (Figure 50).

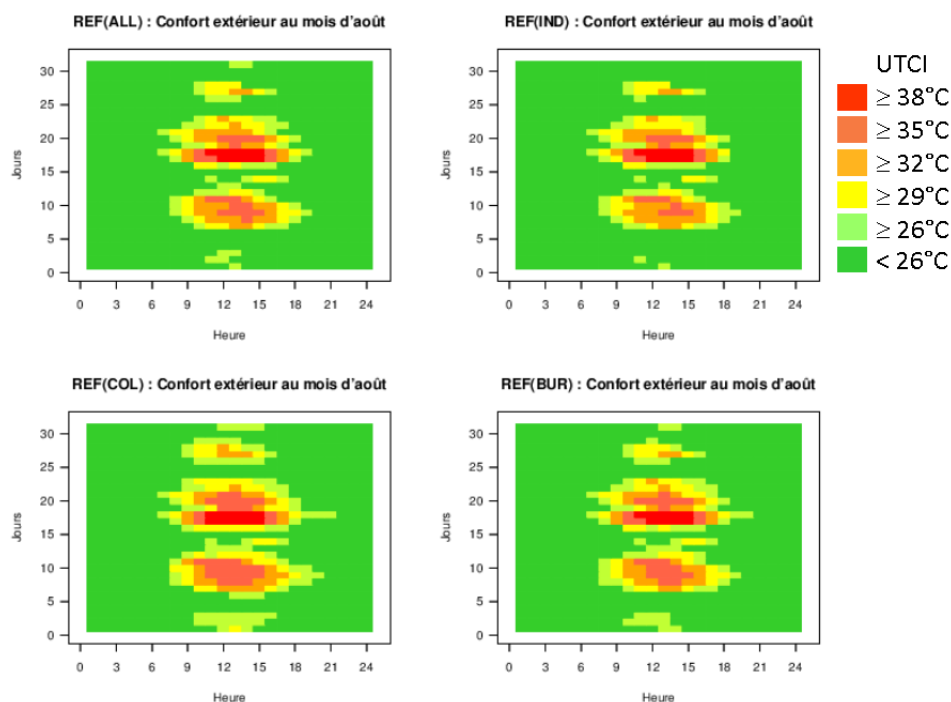


Figure 50 : Evolution des conditions de confort extérieur (UTCI) au cours de la journée, et durant tout le mois d'août 2012, calculée à partir du scénario de référence pour l'ensemble du domaine (ALL), les quartiers de logements individuels (IND), de logements collectifs (COL) et de bureaux (BUR).

Quel que soit le type de bâtiments, les conditions de confort thermique sont bonnes au cours de la nuit (UTCI < 26°C systématiquement pendant la nuit).

En journée, le stress thermique augmente et atteint un niveau assez élevé pour les journées les plus chaudes, entre 9h et 18h.

Les conditions de confort sont un peu plus défavorables dans les logements collectifs par rapport aux logements individuels, probablement car ils sont situés dans des environnements moins végétalisés.

On compare ensuite les résultats obtenus pour les différents scénarios :

Le taux de végétalisation joue directement sur les conditions de confort : plus il est important, meilleur est le confort thermique pendant la journée. C'est vrai en particulier dans les zones résidentielles et de logement collectif.

En termes de confort, on n'observe pas de différences significatives entre le scénario de référence et NOTREE, dans lequel les arbres ont été remplacés par de la végétation basse.

L'usage de toitures végétalisées permet d'améliorer les conditions de confort thermique extérieur dans les zones de logements collectifs et de bureaux car les superficies de toitures sont suffisamment importantes.

L'effet est tout à fait négligeable dans les zones de logements individuels.

Approche sensible :

Le travail a été réalisé en sous-traitance par le atelier d'architecture CASA, dans la suite de la recherche de configurations végétales remarquables du point de vue des ambiances (cf. TYPO 2). Une partie des configurations relevée a été investiguée, sous forme d'analyse spatiale des espaces, d'observations des usagers, d'entretiens et d'enregistrements d'ambiances sonores.

La grille d'analyse pour ce travail a été :

- Intelligence du plan masse
- Intelligence du végétal
- Effets sensibles remarquables
- Proxémie
- Expressions remarquables
- Rapport affectif des habitants avec le végétal de leur quartier

Le travail aboutit ainsi à une description très riche du quartier et de la perception qu'en ont les habitants et à des recommandations quant à l'utilisation du végétal dans la ville dense :

- Le végétal en ville permet d'accorder les rythmes de l'homme et du monde (par exemple au bord de l'eau à Port-Boyer et sur les pelouses des Dervallières à Nantes).
- Le végétal, c'est sauvage et domestique à la fois (Port-Boyer).
- Avec le végétal on peut habiter la ville, son quartier, en le quittant peu parce qu'il « fabrique » un dedans au dehors et un dehors à l'appartement. Le végétal apaise, y compris soi-même. Les clairières et les antichambres boisées semblent avoir de l'avenir (quartier des États-Unis à Lyon, rue de Meaux à Paris).
- Avoir le végétal avec soi en ville, c'est sans doute ressentir qu'une résistance à tout ce qui détruit les liens entre les hommes est possible (cf. C. Younès), qu'un « reliage » s'invente (parc potager de la Fournilière à Nantes).
- Dans son jardin l'urbain est actif en tant que citoyen du monde, il est en empathie avec les autres, avec la campagne nourricière. Le jardin est un lieu d'expression de son talent, comme autrefois dans les cités-jardins, très sociales (et aujourd'hui dans le parc potager de la Fournilière à Nantes). Le jardinier prend du temps, du temps qui fait du lien social.
- Le filtrage « visuel » du végétal est efficace s'il n'y a pas d'activité bruyante au sol (rue de Meaux à Paris) ou en façade (bois du Bout des Landes à Nantes). Dans le square des Bouleaux rue de Meaux, la distance entre vis-à-vis est de l'ordre de 25 m. Regards et écoutes sont dans un rythme concordant. Le boisement accueille des activités, en empêche d'autres. Il tient les odeurs. Le square est fermé au public jour et nuit.
- À 50 m et sans filtrage végétal, le vis-à-vis reste à distance familière (square Georges-Duhamel) si le rythme de fermeture du petit parc public le soir permet de se retrouver entre soi, d'avoir le « calme » entre voisins.
- Les perceptions à 360° sur le végétal sont extrêmement valorisées par l'utilisateur (Port-Boyer à Nantes).
- Le logement doit rester à hauteur de l'arbre (squares de la rue de Meaux et Georges-Duhamel à Paris, quartier des États-Unis à Lyon). Au-delà de neuf à dix étages, le végétal apporte peu de perceptions.
- Dans notre recherche entre distances spatiales et concordances sensibles, il semble que les sens (visuels et auditifs surtout) et le végétal ont, pour l'habitant des villes, un débit d'informations plus faible à longue distance. Le gradient d'information est à la fois quantitatif et qualitatif. La richesse d'information va en augmentant avec la proximité (comme quand on s'approche des branches de l'arbre à la fenêtre).
- La proximité de nombreux petits espaces naturels en ville (comme dans la ZAC Masséna à Paris) fait un réseau de parcours attractifs. Cette mise en réseau des « espaces verts » est à regarder de très près pour l'avenir, car elle semble donner un certain anonymat aux lieux naturels.
- Au pied de l'immeuble d'habitations, l'aménagement de « salons végétalisés extérieurs » (pour jouer aux boules, étendre le linge, s'asseoir par terre pour prendre le frais, comme dans le site de la Ville-en-Pierre à Nantes) propose un réseau d'échanges sociaux différent.
- L'appréciation du végétal est renforcée par la perception du calme (jardin du Palais Saint-Pierre à Lyon, accès au jardin Georges-Duhamel à Paris).
- Pour ne pas paraître triste, le bois du Bout des Landes (Nantes) a besoin de variétés végétale et colorée.
- Planter le végétal et le laisser pousser avant de construire les logements est une idée féconde (les Dervallières à Nantes).

L'ensemble du travail est disponible dans les références suivantes : (Balaÿ and Bardyn, 2013; Balaÿ, 2012)

Eval 6 – INFLUENCE SUR LES PRATIQUES DES BATIMENTS ET DES ESPACES VERTS

Description initiale EvalPRIV6 : Nous nous intéresserons aux bâtiments collectifs intégrant des dispositifs végétaux en façade, en contact avec des espaces accessibles (balcons, pieds d'immeubles)

et en toiture ainsi qu'à certains projets intégrant des jardins potagers en cœur d'îlot. L'objectif de ce travail d'enquête sera d'identifier d'éventuelles modifications des pratiques des habitants dues à la présence de ces dispositifs végétaux. Il s'agira de recueillir leur perception du bâtiment qu'ils habitent : attribuent-ils à ces dispositifs des modifications liées à l'image sociale qu'il renvoie, aux ambiances, aux pratiques ? Il s'agira également de déterminer le degré de participation des habitants à l'entretien végétal du bâtiment : préfèrent-ils être acteurs ou seulement usager ? Quel niveau de décision (choix des espèces...) leur semble approprié à leur usage de locataire ou de propriétaire ?

Description initiale EvalCOLL6: Les types d'espaces verts étudiés seront choisis en cohérence avec les autres enjeux abordés dans ce projet. Cependant, ce sont les aménagements récréatifs qui retiendront notre attention vis-à-vis de ces enjeux sociaux : les espaces verts des logements collectifs (grands ensembles sociaux par exemple), les espaces verts à proximité de bâtiments tertiaires...

Une évaluation sociologique et anthropologique des espaces verts collectifs sera menée en déterminant les individus ou les groupes d'individus qui utilisent ces espaces. Ensuite, des éléments plus détaillés seront abordés à travers les questions suivantes : quelles pratiques ou comportements différents ces projets végétalisés induisent-ils par rapport à des espaces plus minéraux ? La fréquentation de l'espace public est-elle modifiée par la présence de la végétation ? En quoi la revégétalisation de certaines zones peut-elle transformer l'identité d'un lieu au point d'en changer son affectation ? La méthode utilisée sera la suivante : en premier lieu nous établirons une typologie des pratiques des espaces au travers d'observations destinées à recenser les types d'usages ou d'activités de ces espaces végétalisés, et les fréquences de ces pratiques ; en second lieu nous compléterons les observations par une enquête structurée autour d'un questionnaire à questions fermées afin de connaître les caractéristiques socio-démo-économiques des habitants du quartier mais aussi leur ressenti sur la qualité environnementale des espaces verts fréquentés et sur leur cadre de vie urbain en général. La ZAC Bottière Chêneie constituera le terrain d'enquête local.

Travail réalisé :

Espaces verts :

Un premier travail a été réalisé par un post-doctorant, Brice Tonini (Long and Tonini, 2012; Tonini, 2011), sur la demande de végétation en ville. Il mène aux conclusions suivantes.

Au terme de cette étude, l'importance de la demande de végétation de la part des habitants ressort de façon flagrante. Plus que la demande, c'est le ressenti de la nature urbaine qui est remarquable. Elle constitue un élément incontournable de la vie quotidienne des citoyens. Que l'on y prête attention ou non, qu'on le fasse à l'occasion d'une activité particulière ou quotidiennement en regardant autour de soi, la nature est présente et répond à des objectifs divers. Le fait que la population soit demandeuse de végétation n'a rien d'étonnant. Non seulement, elle apporte une réelle plus-value en qualité de vie mais de plus, il est difficile d'imaginer beaucoup de personnes répondant par la négative à la question « souhaitez-vous plus de nature en ville ». La première réaction est presque toujours positive envers la nature. Ce n'est que lorsqu'elle est réfléchie que la réponse peut changer ou, du moins, être reformulée et/ou réévaluée. Durant l'enquête, le retour d'une nature sauvage a été souvent plébiscité de façon spontanée. Ce n'est qu'à la vue d'une photographie du jardin de l'Île Mabon que les personnes interrogées ont revu leur attitude et fréquemment préférées « un juste milieu » entre un parc classique et le jardin présenté.

Le type de végétation souhaité est, en revanche, plus inattendu. Si le discours et la communication autour du mouvement durable et de la nature sauvage est très répandu, les habitants restent attachés aux espaces verts qu'ils connaissent et ont l'habitude de fréquenter. Ils ne sont pas hostiles à une évolution, mais la crainte du changement est présente, et les espaces verts actuels correspondent à ce qu'ils viennent y chercher. Alors pourquoi changer quelque chose qui convient pour autre chose dont on n'est pas certain ? C'est à cette question que doivent répondre gestionnaires et administrateurs des espaces verts par une information adaptée.

Si les pratiques des espaces verts et leurs ressentis sont relativement homogènes, de grandes tendances se dégagent. Parmi elles, la recherche d'une nature qui cache la ville ou permet de l'oublier pour un temps et la demande d'une nature propre et maîtrisée sont des constantes.

Les propos de Nathalie Blanc (Blanc, 2009) font écho à ces idées : « la pertinence des actions publiques en matière de verdissement urbain est analysée à 3 niveaux : le premier niveau relève de la tradition en matière d'urbanisme végétal et renvoie au concept de décor urbain ; le deuxième met l'accent sur la qualité du milieu urbain en termes de fonctionnement du système écologique et des rapports des citoyens à l'environnement. Enfin, le troisième interroge la manière dont l'urbanisme végétal participe à l'édification d'une ville écologique à l'échelle des agglomérations et des métropoles urbaines ». La volonté de la recherche est de situer les attentes

des habitants au sein de ces trois niveaux. La demande de nature n'est pas nécessairement diriger vers le toujours plus. Il est incontestable que toute destruction du végétal en ville provoque des réactions outragées de la part des habitants. Cependant, il faut également rester conscient qu'en certaines circonstances, retirer de la végétation peut être synonyme de bien-être pour les individus. À titre d'exemple, la rénovation actuelle du quartier du Bouffay à Nantes a entraîné l'abattage et l'élagage de grands platanes. Le contraste a alors été marqué entre les riverains offusqués d'assister à la destruction de nature et ceux, à l'inverse, qui retrouvant de la lumière, se sont réjouis.

Que l'on veuille plus de nature ou non, les usages sont nettement connus et définis contrairement au ressenti envers les espaces verts. Ce dernier est plus varié et moins bien cerné. Présente sans être toujours vue, pratiquée sans être nécessairement réfléchie, la nature en ville souffre fréquemment d'un manque de reconnaissance et de considération. Avant de penser à un nouveau type de végétation urbaine, il n'est pas inutile de réfléchir à de nouveaux rapports avec les habitants.

Lien avec l'habitat, la ville

Cette partie a été traitée au travers de 3 travaux déjà cités : Le travail de Sabine Lepère (Lepère, 2011, 2010) avec les jardins accolés à l'habitat, le travail d'Hector Colonelli (Colonelli, 2011) pour les façades végétale et le travail de CASA pour les espaces verts à proximité du logement (Balaÿ, 2012).

Eval 7 – ACCEPTABILITE - REGLEMENTATION

Description initiale : Dans le cadre de l'action « quartiers éco-innovants » menée par la Région des Pays de La Loire, trois éco-quartiers régionaux feront l'objet d'un suivi par une Assistance à Maîtrise d'Ouvrage spécialisée et d'expérimentations. Les trois maîtrises d'ouvrage n'ont pas encore établi leurs cibles. Cependant, lors de la première phase de cette action, des dispositifs végétaux ont été envisagés pour les espaces publics ou privés, avec des fonctions hydriques, thermiques, esthétiques ou récréatives. Nous suivrons la phase de conception des projets afin de relever dans les décisions prises entre décideurs, concepteurs et réalisateurs (entreprises) quels sont les éléments pris en compte, notamment par rapport aux retours d'expérience de ces acteurs.

Dans cette partie d'évaluation, nous intégrerons également, pour la partie bâtiment, les contraintes réglementaires qui peuvent éventuellement faire frein aux techniques. Nous utiliserons pour cela la base réglementaire du CSTB.

Travail réalisé :

Acceptabilité

La partie acceptabilité de l'évaluation a été traitée dans deux travaux précédemment cités : les enquêtes réalisées par Virginie Anquetil auprès des opérationnels qui ont souligné les difficultés rencontrées dans la gestion d'un certain nombre de dispositifs. Cette difficulté ne relevait pas toujours d'aspects techniques mais plus souvent de l'organisation interne. Par exemple, la gestion des noues végétalisées à Nantes Métropole peut relever des services communaux des espaces verts s'il s'agit de noues classées « paysagées » ou des services de Nantes Métropole si elles sont classées comme noues « hydrauliques » donc faisant partie d'un réseau. La question des arbres d'alignement est similaire. Pour les toitures, ce sont les aspects techniques qui sont ressortis, avec une réelle difficulté pour les premières toitures construites, qui ont été annoncées comme ne nécessitant pas d'entretien. Les dispositifs nécessaires (garde corps) n'ont de ce fait pas prévus, alors que dans la pratique, les toitures nécessitent des interventions qu'il devient très difficile de réaliser.

S'agissant de l'acceptation des citoyens, nous avons surtout ciblé les façades végétales car nous pensions qu'elles pouvaient entraîner des difficultés de voisinage, notamment du fait de l'humidité et des insectes. Les enquêtes d'Hector Colonelli (Colonelli, 2011) n'ont rien fait ressortir de tel, même la façade peu développée et ruisselante de la rue des Olivettes à Nantes est créditée d'un avis favorable des riverains.

Réglementation

La partie réglementation a été réalisée par le CSTB (Sabre and Normand, 2013).

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

Les toitures terrasses extensives (épaisseur de végétalisation entre ~4 et 15 cm), ont des systèmes de revêtement d'étanchéité et de végétalisation qui font l'objet d'Avis Techniques et Documents Techniques d'Application et qui sont des textes de références applicables. Les ATec et DTA font référence aux dispositions des règles professionnelles lorsque c'est nécessaire.

A ce jour, pour les toitures terrasses semi-intensives (épaisseur de végétalisation entre 12 et 30 cm), seules les règles professionnelles décrivent les modalités de conception et de réalisation de ce type de toiture-terrasse.

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

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

EVAL 8 - BILAN CARBONE

Description initiale : L'étude de l'impact des aménagements en espaces verts sur l'environnement devient un enjeu prioritaire pour les gestionnaires et les professionnels du secteur. Nous traiterons ici d'une partie de cet impact, l'empreinte carbone (rapport séquestration/émissions) des typologies identifiées, en relation avec les opérations d'entretien qu'elles nécessitent (fertilisation, taille, fréquence et hauteur de tonte, irrigation...) mais aussi avec la production des semences utilisées. De nombreuses études permettent déjà de quantifier un lien entre l'utilisation d'énergie fossile et la quantité de CO₂ émise ou entre la nature des espèces végétales et leur niveau de séquestration. Il est nécessaire de capitaliser ces connaissances en les rassemblant à partir de publications scientifiques françaises et étrangères et de bibliographie pratique sur les modes de gestion et d'entretien des plantes de façon à identifier le poids relatif des opérations culturales, de production de semences dans l'empreinte carbone des espaces verts. Nous pourrions alors mettre en rapport ces bilans avec les évaluations énergétiques. La conduite de ce travail et la formalisation des connaissances se feront notamment en complétant une base de données informatique construite pour l'évaluation de l'empreinte Carbone des gazons. La méthodologie mise en œuvre s'appuiera sur les références de la méthode Bilan carbone® et du guide des facteurs d'émissions publiés par l'ADEME. Ces méthodes sont applicables aux espaces collectifs comme aux espaces privés, cependant, les paramètres à prendre en compte, doivent être différenciés du fait des modes de gestion différents.

Travail réalisé :

Le travail a été réalisé par Philippe Boudes dans le cadre d'une prestation commandée par Plante & Cité. Il a consisté en une analyse la littérature abordant le rôle de la végétation urbaine comme puits et source carbone (Boudes et al., 2013). Dans ce document, après un exposé la démarche méthodologique, les principales caractéristiques des études recensées sont présentées. Celles-ci mettent en avant la capacité des arbres et des forêts urbains à stocker et séquestrer du carbone. La plupart des travaux s'appuient sur des estimations de biomasse végétale à partir d'équations allométriques. La masse de carbone capturée dépend notamment du nombre d'arbre, de leur maturité, des espèces, de leur vitesse de croissance et du taux de mortalité. Le carbone « évité » grâce à la présence de végétation est également pris en compte. Parmi les impacts indirects, les études s'intéressent aux bénéfices de l'ombre apportée par les arbres, et plus généralement aux économies d'énergies induites par la régulation climatique que permet la végétation. D'autres éléments, dont la capture de polluants, la séquestration du carbone par le sol, et les effets des toitures végétalisées, sont présentés. Les émissions associées à la végétation urbaine sont principalement liées à la création et à l'entretien de ces surfaces. Les estimations référencées sont hétérogènes, ciblent différents dispositifs et ne prennent pas en compte les mêmes facteurs d'émissions. Cependant, l'ensemble des études s'accordent pour montrer que, quel que soit le dispositif envisagé, la végétation urbaine joue un rôle de puits de carbone, surtout grâce aux arbres. Les mêmes travaux soulignent l'importance du taux de mortalité des arbres pour valoriser une capture optimale

de carbone tout en minimisant les émissions ; et la difficulté de prendre en compte l'ensemble des effets directs et indirects de la végétation.

EVAL 9 – BILAN GLOBAL

Description initiale : Nous aurons dans les sous-volets de EvalCOLL et EvalPRIV évalué un à un les impacts thématiques de différents dispositifs. Pour une évaluation plus globale, nous éviterons d'entrer dans des approches systématiques (Cherqui, 2005) et préférerons mettre en évidence la qualification ou quantification des points forts et faibles de chaque dispositif, à l'échelle micro, mais aussi de son application à l'échelle urbaine. Dans cette évaluation globale, nous chercherons à déterminer les effets de seuil, à partir de quelle échelle l'application d'une solution végétale devient réellement intéressante. Les résultats seront versés sous forme de synthèse dans la typologie du volet TYPO.

Travail réalisé :

Deux formes de synthèses ont été réalisées : une synthèse scientifique et des fiches destinées aux opérationnels.

Synthèse scientifique :

Elle a été réalisée sur la base d'un état de l'art international auquel sont ajoutés nos résultats. Cet état de l'art a été publié sous forme d'un ouvrage dans la collection Synthèses des Editions QUAE (Musy, 2014). Aux enjeux traités dans vegDUD, nous en avons ajoutés deux :

- la biodiversité, avec une synthèse réalisée par Philippe Clergeau ;
- la qualité de l'air, traitée par Patrice Mestayer.

Sommaire de l'ouvrage :

Introduction : Comment prendre en compte le végétal dans l'espace urbain ?

Les sept enjeux d'une approche multidisciplinaire

Chapitre 1. Présence végétale en ville : quelle connaissance ?

Introduction

Etat des lieux et évolution de la place de la végétation en ville

Nouvelles méthodes d'acquisition et de traitement de la donnée

Conclusion

Chapitre 2. Impacts sur les microclimats urbains

Introduction

Les phénomènes physiques en jeu

Approches expérimentales

Modélisation et de simulation des dispositifs végétaux urbains

Les effets de différents types de végétation

Effet de la configuration spatiale de la végétation

Conclusion

Chapitre 3. Impacts sur la consommation énergétique et le confort dans les bâtiments

Introduction

Les phénomènes physiques en jeu

Approches expérimentales

Modélisation et simulation des impacts thermiques

Les effets de différents types de végétation

Conclusion

Chapitre 4. Gestion des eaux pluviales en milieu urbain et végétation

- Introduction
- Les phénomènes physiques en jeu
- Approches expérimentales
- Modélisation et de simulation des effets de la végétation
- Les effets de différents types de végétation
- Conclusion

Chapitre 5. Ambiances urbaines, approches physiques

- Introduction
- Notion d'ambiance
- Confort thermique
- Eclairage naturel
- Acoustique
- Conclusion

Chapitre 6. Influence de la végétation sur la qualité de l'air

- Introduction
- Les phénomènes physiques et physico-chimiques mis en jeu
- Approches expérimentales
- Problèmes de modélisation
- Les effets des différents types de végétation
- Conclusion

Chapitre 7. Empreinte carbone

- Introduction
- Éléments de définition
- La végétation urbaine comme puits de carbone
- Effets indirects de la végétation urbaine
- Les émissions de CO₂ à travers les cycles de vie de la végétation et son entretien
- Limites
- Conclusion

Chapitre 8. Biodiversité urbaine

- Introduction
- La biodiversité urbaine et le contexte des services écologiques
- Les méthodes d'investigation
- Des résultats en biodiversité urbaine
- Conclusion

Conclusion et perspectives

Fiches techniques :

La synthèse des évaluations a été également réalisée sous une forme transférable aux opérationnels de la ville : questionnaires d'espaces verts, urbanistes, architectes, décideurs... Les fiches ont été réalisées par Guillaume Pommier, Caroline Gutleben, Damien Provendier et Marjorie Musy. Un effort important a été produit afin de rendre l'ensemble des résultats sous une forme cohérente et compréhensible par des opérationnels qui ne seront pas spécialistes de l'ensemble des enjeux traités. Pour cela, des fiches reprenant les bases théoriques expliquées et illustrées (Figure 51 et Figure 52) de manière très simple ont été ajoutées.

Sommaire des fiches (64 pages) :

Introduction

Enjeux & Méthodes

- Enjeux des services écosystémiques
- Une typologie du végétal urbain
- Apport de la télédétection et connaissance du patrimoine végétal : apport des SIG et de la télédétection
- Expérimentation et mesures du climat urbain
- Modélisation des impacts du végétal en ville

Les 4 fiches techniques VegDUD

- Fiche 1 : Techniques alternatives de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal
 - Gestion des eaux pluviales : Les technique alternatives
 - Cadre Règlementaire de la gestion des eaux pluviales
 - Eaux pluviales et pollution
 - Gestion des eaux pluviales, cycle de l'eau, climatologie
- Fiche 2 : Façades et toitures végétalisées
 - Toitures végétalisées
 - Façades végétalisées
 - Cadre règlementaire des façades et toitures végétalisées
 - Evaluations qualitatives des impacts : confort thermique, consommation énergétique, climatologie
- Fiche 3 : Arbres
 - Les arbres en ville
 - Cadre réglementaire et promotion de l'arbre urbain
 - Evaluation des impacts
- Fiche 4 : Surfaces enherbées /surfaces sans couvert végétal
 - Typologie des surfaces enherbées
 - Gestion
 - Evaluation des impacts

Conclusion, perspectives

Des clés pour comprendre : notions physiques et enjeux de VegDUD

- Les clés pour comprendre
- Bilan énergétique
- Consommation d'énergie et confort intérieur
- Bilan hydrologique
- Bilan énergétique
- Ilôt de chaleur urbain
- Confort thermique extérieur
- Microclimat urbain et type de quartier
- Acoustique
- L'environnement sonore

Bibliographie : principales références par thème

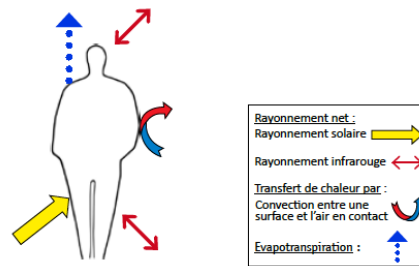


Figure 51 : Illustration des notions théorique des fiches, bilan thermique du corps.

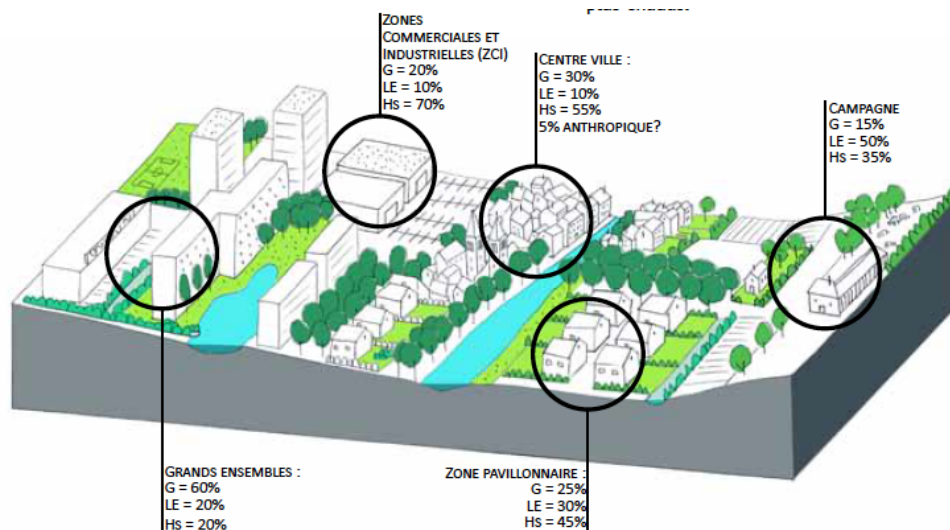


Figure 52 : Illustration des notions théoriques des fiches, répartition de l'énergie reçue par type de quartier.

Les fiches techniques sont données en [annexe 6](#).

RESULTATS :

Des résultats ont été rendus pour chaque couple phénomène / dispositif étudié, il figurent dans les différents rapports cités ci-dessus.

Au final, du fait des spécificités des différents modèles, de leurs échelles d'étude, des temps de mise en œuvre des simulations, il est difficile d'avoir une approche totalement cohérente du point de vue des scénarios. Nous synthétisons dans le Tableau 11 les conditions d'étude par dispositif et phénomène.

Thématique	Confort extérieur	Climat	Demande énergétique		Confort intérieur	Hydrologie	Acoustique
Façades végétales	A l'échelle de la rue Dispositifs pris individuellement ou en combinaison	A l'échelle de la rue	A l'échelle de la rue	A l'échelle du bâtiment	A l'échelle du quartier		A l'échelle de la rue
Toitures végétales	A l'échelle de la Ville Toitures, surfaces enherbées et arbres avec différentes intensités	A l'échelle du grand quartier	Dispositifs pris individuellement ou en combinaison	A l'échelle du quartier	Dispositifs pris individuellement ou en combinaison	A l'échelle du quartier	Etude de l'impact de la répartition des surfaces, et combinaison de 2 dispositifs
Surfaces enherbées		Différentes densités	Différentes densités	Dispositifs pris individuellement ou en combinaison		Différentes densités pour les arbres et noues.	
Arbres							
Noues végétalisées							

Tableau 11 : Synthèse des résultats obtenus pour les évaluations

Même si l'exercice est difficile, non seulement parce que les modélisations ont des limites, mais aussi parce que nos simulations dépendent de nombreuses hypothèses de description de la ville et de la végétation, nous avons tenté d'avoir une vision consolidée et hiérarchisée de l'impact des dispositifs, donnée dans le Tableau 12.

Thématique	Confort extérieur	Climat	Demande énergétique	Confort intérieur	Hydrologie	Acoustique
Façades végétales	Apport limité au cas où l'individu est à l'ombre	Effet important dans les rues confinées	Effet dans le cas de bâtiments non isolés	Effet dans le cas de bâtiments non isolés		Effet sur la propagation dans les rues voisines
Toitures végétales		Effet très faible dans les rues	Effet sensible dans le cas de bâtiments non isolés et pour les étages supérieurs	Effet sensible dans le cas de bâtiments non isolés et pour les étages supérieurs	Effet sensible	Effet sur la propagation dans les rues voisines
Surfaces enherbées	Apport limité au cas où l'individu est à l'ombre	Effet si irrigation	Effet faible	Effet faible		
Arbres	Effet d'ombrage + abaissement de la température d'air	Effet important	Effet dans le cas de bâtiments fortement vitrés			
Noues végétalisées					Effet important	

Effet non constaté	Effet faible	Effet sensible dans certains cas	Effet moyen dans certains cas	Effet le plus significatif
--------------------	--------------	----------------------------------	-------------------------------	----------------------------

Tableau 12 : Hiérarchie des effets obtenus. En bas, l'échelle de hiérarchie.

Ce bilan d'évaluation peut être utilisé, avec toutes les réserves émises ci-dessus, pour la conception, en prenant en compte en sus les intentions d'ambiance et les contraintes d'entretien, de réglementation et de coût.

7. CONCLUSION

Les nombreux résultats du projet VegDUD donnent des ordres de grandeur des impacts qui peuvent être attendus des dispositifs végétaux. Ces résultats sont obtenus dans des contextes particuliers en termes de formes urbaines, des usages, des climats, des sols, des plantes.... Il est donc très difficile de les transposer. En effet, le fonctionnement du végétal dépend d'un très grand nombre de facteurs fortement variables en ville. De nombreuses interrelations ont ainsi pu être soulignées, et il a été constaté que nombre d'entre elles sont encore peu explorées par la recherche et difficiles à prendre en compte dans les modèles, comme en témoignent les exemples suivants :

- L'impact climatique du végétal dépend en partie de l'eau que peuvent utiliser les plantes. Sans eau, elles n'ont qu'une fonction d'ombrage, tant qu'elles peuvent se maintenir en vie. Le fonctionnement hydrologique de la ville est donc un sous-système clé, sous-système dans lequel la végétation agit également. Cependant, il est difficile de représenter ce sous-système dans tous les modèles qui deviendraient très complexes.
- Le fonctionnement des plantes dépend aussi de leur positionnement dans la forme urbaine. Elles apportent peu du point de vue climatique si elles sont positionnées dans l'ombre des bâtiments. Ceci reste difficile à prendre en compte quand on travaille à l'échelle de la ville, où les géométries sont très simplifiées.
- La gestion (interventions humaines) et les conditions de croissance des plantes (climat, accès à la lumière, à l'eau, type de sol, exposition à la pollution, aux dégradations humaines ou animales...) sont des paramètres très influents qui n'ont pas été pris en compte, ou d'une manière très partielle. Nous manquons de données de terrain sur le fonctionnement du végétal en ville à micro-échelle. Même des données basiques, comme le LAI (Leaf Area Index) sont difficiles à obtenir pour des végétaux urbains.

Il en va ainsi pour presque tous les résultats présentés et quelles que soient les fonctions étudiées : il est important de prendre en compte des conditions urbaines réalistes. Nous l'avons fait pour part, mais le principe des scénarios était davantage d'obtenir des tendances afin de discriminer les dispositifs évalués.

Pour la synthèse, nous avons procédé par juxtaposition et mise en cohérence des résultats obtenus. Pour élaborer une synthèse plus intégrée des bénéfices du végétal, l'approche de l'évaluation de l'empreinte carbone du végétal urbain semble être une piste intéressante. Elle permet d'aborder un ensemble large de paramètres et de vérifier qu'ils sont bien pris en compte dans tous les termes du bilan.

Cependant, on peut reprocher à cette méthode son approche comptable, qui ne permet pas de rendre compte de tous les bénéfices de la végétation, plus difficiles à apprécier quantitativement, comme la perception des ambiances, les rôles sanitaires, sociaux qui jouent pour beaucoup dans l'habitabilité des espaces urbains. Par ailleurs, nous sommes encore très loin de pouvoir l'appliquer rigoureusement, car la donnée manque sur grand nombre des espaces urbains (jardins privés par exemple).

L'analyse des résultats par types de dispositifs végétaux appelle plusieurs remarques :

- les façades et toitures ont attiré l'attention des chercheurs ces dernières années, sans doute du fait de la nécessité d'étudier ces pratiques de compensation de l'imperméabilisation des sols, leur mise en compétition avec des formes végétales plus traditionnelles comme les arbres n'est pas très concluante. Les toitures végétales auront un effet faible sur le climat urbain et le confort dans les rues, mais un impact hydrologique intéressant et un impact énergétique important l'été sur les bâtiments difficiles à isoler, de faible hauteur, pour lesquels elles pourront de surcroît présenter un intérêt esthétique.
- les arbres sont performants en terme d'adaptation climatique, tant pour l'atténuation de l'îlot de chaleur urbaine que pour maintenir des conditions de confort acceptables dans les espaces urbains. Du point de vue de la consommation énergétique des bâtiments, cela dépend du climat et des éventuelles compensations entre gains d'énergie réalisés sur l'été et pertes en hiver. Par ailleurs, du point de vue du bilan carbone, ils ont un effet très positif, surtout si l'arbre nécessite peu d'entretien et si son bois trouve un usage à la fin de sa vie.

Au final, chaque dispositif présente des atouts et points faibles différents. Compte tenu de la contrainte d'espace qui se pose dans la ville dense, une suggestion peut être de ménager une place suffisante pour toutes les formes de végétation. Il est sans doute également préférable d'éviter la réduction massive de la végétation au sol, même compensée par des alternatives techniques sur les bâtiments. L'investissement des toits comme

cela est d'ores et déjà proposé dans des projets est une évolution très séduisante, mais pourrait s'avérer contreproductive si elle s'effectue au détriment des arbres, tant du point de vue de la physique de la ville que de son usage. Les dispositifs végétaux techniques, toitures et façades végétales, noues végétalisées, jardins de pluie, etc., peuvent au contraire être vus comme un moyen de réinvestir des surfaces supplémentaires.

L'articulation des approches physiques et quantitatives et des approches des sciences de l'homme et de la société restent une difficulté pour aborder des sujets tels que le rôle du végétal. Si les chercheurs qui mènent ces approches savent se côtoyer, s'écouter, apprendre les uns des autres, ces approches restent plus dans une complémentarité que dans une véritable articulation. Celle-ci nécessite que des chercheurs aient la capacité à investir les deux champs disciplinaires, mais peut être est-ce plus le rôle des opérationnels, urbanistes, architectes ... que celui des chercheurs. En ce domaine, VegDUD est également un premier pas. Même s'il est difficile de le faire paraître ici, l'effort d'interconnaissance et de synthèse a été réel, tout au long du projet.

Les perspectives de recherche à l'issue du projet VegDUD sont très nombreuses, notamment pour approfondir nos résultats, mieux envisager les interactions et les paramètres non pris en compte. Le projet nous a permis de mettre en place les premières connaissances et les outils (expérimentaux et numériques) nécessaires à cette mise en place. Ils seront mis à profit à cet effet.

D. ANNEXES

1. **ANNEXE 1 : DOCUMENTS RELATIFS AU VOLET COORD**
2. **ANNEXE 2 : DOCUMENTS RELATIFS AU VOLET TYPO**
3. **ANNEXE 3 : DOCUMENTS RELATIFS AU VOLET PHYSIO**
4. **ANNEXE 4 : DOCUMENTS RELATIFS AU VOLET EXPE**
5. **ANNEXE 5 : DOCUMENT RELATIFS AU VOLET MODE**
6. **ANNEXE 6 : DOCUMENT RELATIFS AU VOLET EVAL**

E. REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ANR d'avoir soutenu ce projet, qui a permis à l'ensemble des laboratoires participants de développer des recherches sur une thématique transversale extrêmement intéressante et favorisant les collaborations.

Nous remercions également :

- l'ADEME pour son soutien à travers le co-financement des thèses de Laurent Malys et d'Adrien Gros ;
- les Régions des Pays de la Loire et Poitou Charentes pour le co-financement respectivement de la thèse de Laurent Malys et d'Adrien Gros ;
- le pôle de compétitivité Végépolys et le PGCE pour leur suivi et leur action de valorisation,

Enfin, nous tenons à remercier plus particulièrement

- la Direction Energie Environnement Risques de Nantes Métropole pour sa participation active au projet et en particulier Marilyne Guillard, Joël Garreau et Alban Mallet ;
- le Service des Espaces Verts et Environnement de Nantes, pour son aide logistique lors des campagnes et pour la participation aux réflexions de Jacques Soignon, Romaric Perrocheau et Françoise Barret.

Nous espérons que cette collaboration de 4 ans aura également été fructueuse pour leur pratique professionnelle.

F. LISTE DES PARTICIPANTS AU PROJET

Karine Adeline (ONERA), Hervé Andrieu (IRSTV/Ifsttar), Virginie Anquetil (Plante & Cité) Karina Azos (IRSTV/Cerma), Insaf Bagga, (LHEEA/ECN), Olivier Balaÿ, (Cresson/Ensa Grenoble), Jean-Luc Bardyn (Cresson/Ensa Grenoble), Françoise Barret (Seve, Ville de Nantes), Rafik Belarbi (LaSIE, université de La Rochelle), Arnaud Bellec (LIENSs), Amar Bensalma (IRSTV/CERMA), Erwan Bocher (IRSTV), Philippe Boudes (Plante & Cité), Bernard Bourges (Gepea/EMN), Emmanuel Bozonnet (LaSIE, Université de La Rochelle), Xavier Briottet (ONERA) Jean-Marc Brun (Ifsttar), Yves Brunet (Ephyse/Inra), Aurore Brut (Cesbio), Isabelle Calmet (IRSTV/LHEEA), Katia Chancibault (Ifsttar), Martine Chazelas (IRSTV/Cerma), Jinhui Chen (IRSTV/LHEEA), Jean-Martial Cohard (LTHE), Hecto Colonelli (IRSTV/CERMA), Olivier Connan (IRSN), Cécile De Munck (Game/CNRM), Rabah Djedjig (LaSIE, Université de La Rochelle), Véronique Dom (IRSTV/Cerma), Lin Dong (IRSTV/LHEEA), Maxime Doya (ONERA), Sylvain Dupont (Ephyse/Inra), Bernard Flahaut (Ifsttar), Mirvatte Francis (IRSN), Carina Furusho (IRSTV/LHEEA), Joël Garreau (Nantes Métropole), Jean-Philippe Gastellu Etchegorry (Cesbio), Dominique Gaudin (IRSTV/LHEEA), Jérémie Gaud (IRSTV/LHEEA), Benoît Gauvreau (ifsttar), Matthieu Goriaux (IRSN), Antoine Gourlay (IRSTV), Alexis Guéganno (IRSTV), Eloi Grau (Cesbio), Adrien Gros (LaSIE, Université de La Rochelle), Maryline Guillard (Nantes Métropole), Gwenaël Guillaume (ifsttar), Caroline Gutleben (Plante & Cité), Noëlle Guyon (IRSTV), Didier Hébert (IRSN), Christian Inard (LaSIE, Université de La Rochelle), Mark Irvine (Ephyse/Inra), Sonja Jankowsky (Ifsttar), Zeineb Kassouk (LPGN, université de Nantes), Pascal Keravec (IRSTV/LHEEA), Bruno Lacarrière (Gepea/EMN), Pierre Lagionie (IRSN), Jean-Pierre Lagouarde (Ephyse/Inra), Patrick Launeau (LPGN, Université de Nantes), Sophie Lemaire (Plante & Cité), Aude Lemonsu (Game/CNRM), Arnaud Lepetit (IRSTV/ESO), Sabine Lepère (IRSTV/CERMA), Thomas Leveiller (IRSTV), Philippe L'hermite (ifsttar), Nathalie Long (LIENSs, Université de La Rochelle), Magdalena Maché (IRSTV/LHEEA), Laurent Malys (IRSTV/CERMA), Denis Maro (IRSN), Olivier Martin (LaSIE, université de La Rochelle), Patrice Mestayer (IRSTV), Benjamin Morille (IRSTV/Cerma), Marie-Laure Mosini (Ifsttar), Marjorie Musy (IRSTV/CERMA), Georges Najjar (LSIIT, université de Strasbourg), Françoise Nerry (LSIIT, université de Strasbourg), Laurent Perret (IRSTV/LHEEA) Romaric Perrocheau (Seve, Ville de Nantes), Gwendall Petit (IRSTV), Thibaud Piquet (IRSTV/LHEEA), Guillaume Pommier (Plante & Cité), Damien Provendier (Plante & Cité), Patrick Rannou (IRSTV), Pierre Renou (IRSTV/LHEEA), Antoine Renouard (LIENSs), Vera Rodrigues (IRSTV/LHEEA), Fabrice Rodriguez (Ifsttar), Jean-Michel Rosant (IRSTV/LHEEA), Jean-Marc Rouaud (Ifsttar), Frédéric Rousseaux (LIENSs, université de La Rochelle), Tony Ruiz (IRSTV/LHEEA), Maeva Sabre (CSTB), Thomas Salliou (IRSTV), Jean-François Sini (IRSTV/LHEEA), Jacques Soignon (Seve, Ville de Nantes), Agota Szucs (IRSTV/CERMA), Richard Tavares (IRSTV/LHEEA), Antoine Teillet (IRSTV), Yves Tétard (CSTB), Brice Tonini (IRSTV/ESO) et Deniz Yilmaz (CSTB).

G. BIBLIOGRAPHIE

Adeline, K., Briottet, X., Paparoditis, N., 2012. Material Reflectance Retrieval in Shadow Due to Urban Vegetation from 3D Lidar Data and Hyperspectral Airborne Imagery, in: 32nd EARSeL Symposium 2012, Advances in Geosciences. Konstantinos Perakis & Athanasios Moysiadis, pp. 308–317.

Adeline, K., Briottet, X., Paparoditis, N., Gastellu-Etchegorry, J.-P., 2013a. Material reflectance retrieval in urban tree shadows with physics-based empirical atmospheric correction, in: Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2013 Joint. IEEE, pp. 279–283.

Adeline, K., Chen, M., Briottet, X., Pang, S., Paparoditis, N., 2013b. Shadow detection in very high spatial resolution aerial images: A comparative study. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 80, 21–38.

Akbari, H., Bretz, S., Kurn, D.M., Hanford, J., 1997. Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. Energy Build. 25, 117–126. doi:10.1016/S0378-7788(96)01001-8

Alexandri, E., Jones, P., 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. Build. Environ. 43, 480–493.

Ali-Toudert, F., Mayer, H., 2007. Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. Sol. Energy 81, 742–754. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.10.007

Anquetil, V., 2011a. TYPO 5□: La végétation des scénarios alternatifs - Chapitre 1□: Evolution des formes de végétation dans la ville durable, approche historique et perspectives (Rapport interne VegDUD). ANR VegDUD / Plante & cité.

Anquetil, V., 2011b. TYPO 5□: La végétation des scénarios alternatifs - Chapitre 2□: Proposition de dispositifs végétaux d'intérêts pour les scénarios alternatifs (Rapport interne VegDUD). Plante et Cité, 2011.

Antony, J.-P., 2003. Modélisations de la dynamique de l'étalement urbain Aspects conceptuels et gestionnaires Application à Belfort (Thèse de Doctorat). Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

Azos, K., 2011. Eléments méthodologiques pour la production de scénarios de végétalisation d'un quartier dans un objectif de réduction de la consommation énergétique des bâtiments (Mémoire de stage M2

STEU). ensa Nantes.

Badariotti, D., Banos, A., Moreno, D., 2007. Badariotti, D., Banos, A., Moreno, D. 2007. Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine: le modèle Remus. Cybergeos.

Bagga, I., 2012. Mesure et analyse des flux thermo-hydriques en zone urbaine hétérogène (SAP de l'IRSTV) (Thèse de Doctorat). Ecole Centrale de Nantes.

Balaÿ, O., 1985. La proxémie acoustique dans l'habitat. PUCA, CRESSON, Grenoble.

Balaÿ, O., 2012. L'architecte, l'habitant, le végétal et la densité, in: Ambiances En Acte(s). Presented at the 2nd Congrès International sur les Ambiances, Montréal, Canada.

Balaÿ, O., Bardyn, J.-L., 2013. L'architecte, l'habitat, le végétal et la densité (Rapport VegDUD). CRESSON - UMR CNRS 1563.

Balaÿ, O., Paris, M., Atienza, R., 2006. Les dimensions émergentes de l'intimité au dehors du chez soi dans les zones d'habitat individuel dense□: la notion d'Ambiance comme élément permettant de questionner l'Intimité. PUCA, MCC, CRESSON, Genoble.

Bellec, A., Long, N., 2014. Définition de l'occupation du sol par télédétection sur Nantes Métropole, Approche Orientée Pixel - Approche Orientée Objet (Rapport interne VegDUD (Livrable)). LIENSs, Université de La Rochelle, La Rochelle.

Benjamin, M.T., Sudol, M., Bloch, L., Winer, A.M., 1996. Low-emitting urban forests: A taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rates. Atmos. Environ. 30, 1437–1452.

Bensalma, A., 2013. Le végétal dans les grands ensembles entre transformation urbaine et représentation sensible (Rapport de post-doctorat VegDUD). CERMA /IRSTV, Nantes.

Bensalma, A., Musy, M., Soignon, J., 2013. Nantes, ville nature□: pratiques et expérimentations / The nature city of Nantes: Practice and experimentation, in: Terrin, J.-J. (Ed.), Jardins en ville, villes en jardin, Collection la ville en train de se faire. pp. 131–153.

Blanc, N., 2009. Vers un urbanisme écologique? URBIA Cah. Dév. Durable Urban. Végétal Agriurbanisme 39–60.

Boudes, P., Gutleben, C., Provendier, D., 2013. L'empreinte carbone de la végétation urbaine□: Une analyse des travaux académiques (Rapport VegDUD). Plante et Cité, Angers.

Chancibault, K., Lemonsu, A., Brun, J.-M., de Munck, C., Allard, A., Long,

N., Bellec, A., Masson, V., Andrieu, H., 2014. Hydrological evaluation of urban greening scenarios: application to the City of Nantes, in France. Presented at the 13th International Conference on Urban Drainage, Malaysia.

Chen, J., 2013. Adaptation de la Base de Données Géographique à la campagne FluxSAP 2012 et analyses des footprints des flux en fonction de la fraction de végétation (Mémoire de de stage M2 STEU). Ecole Centrale de Nantes.

Cherqui, F., 2005. Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - méthode ADEQUA (Thèse de Doctorat). Université de La Rochelle, La Rochelle.

Colonelli, H., 2011. Perception des murs végétaux (Rapport de stage). CERMA /IRSTV, Nantes.

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

De Munck, C., Brun, J.-M., Lemonsu, A., Chancibault, K., 2013a. Un modèle climatique urbain pour l'évaluation de politiques de végétalisation à grande échelle (Rapport interne VegDUD (Livrable)). CNRM/GAME & IFSTTAR.

De Munck, C., Lemonsu, A., Bouzouidja, R., Masson, V., Claverie, R., 2013b. The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB. Geosci. Model Dev. Discuss. 6, 1127–1172. doi:10.5194/gmdd-6-1127-2013

Djedjig, R., 2013. Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain (Thèse de Doctorat). Université de La Rochelle, La Rochelle, France.

Djedjig, R., Bozonnet, E., Belarbi, R., 2011. Impact des enveloppes végétalisées sur le microclimat urbain et la performance énergétique des bâtiments (Rapport interne VegDUD). LaSIE, Université de La Rochelle, La Rochelle.

Djedjig, R., Ouldboukhite, S.-E., Belarbi, R., Bozonnet, E., 2012. Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. Int. Commun. Heat Mass Transf. 39, 752–761. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.024

Dong, L., 2012. Experimental investigation of the turbulent flow developing over the transition from urban to vegetation canopy (Mémoire de stage M2 STEU). Ecole Centrale de Nantes.

Doya, M., Briottet, X., Djedjig, R., Ouldboukhite, S.-E., 2012. Mesures de réflectivité dans le spectre solaire sur des surfaces végétalisées -

Description des mesures VEGDUD du 23/09/2011 (Rapport interne). Toulouse (France).

Dubos-Paillard, E., Langlois, P., 2003. Modéliser et simuler l'évolution urbaine par automates cellulaires avec Spacelle. *L'espace Géographique* 357-378.

Dupont, S., Brunet, Y., 2008. Influence of foliar density profile on canopy flow: A large-eddy simulation study. *Agric. For. Meteorology* 148, 976-990.

Dupont, S., Calmet, I., Tavares, R., Maché, M., 2013. Vegetated Urban Canopy Model (Rapport interne VegDUD (Livable)). EPHYSE/INRA & LHEEA/IRSTV.

Furusho, C., 2012. Base de données FluxSAP (Rapport de post-doctorat VegDUD).

Furusho, C., Rosant, J.-M., Mestayer, P.G., 2012. Urban vegetation contribution on the footprint of measured turbulent flux, in: 8th International Conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment. Dublin (Ireland), p. Proceeding 42, 4p.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Demarez, V., Pinel, V., Zagolski, F., 1996. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sens. Environ.* 58, 131 - 156. doi:10.1016/0034-4257(95)00253-7

Gauvreau, B., 2011. VegDUD - rapport bibliographique (Acoustique) (Rapport VegDUD). Ifsttar - Département AME - Laboratoire d'Acoustique Environnementale (LAE), Bouguenais.

Gauvreau, B., Guillaume, G., L'Hermite, P., 2012. Rôle du végétal dans le développement urbain durable□: une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances. *Echo Bruit* 136, 46-53.

Giridharan, R., Lau, S.S., Ganesan, S., Givoni, B., 2008. Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence. *Build. Environ.* 43, 1583-1595.

Gomez, F., Gil, L., Jabaloyes, J., 2004. Experimental investigation on the thermal comfort in the city: relationship with the green areas, interaction with the urban microclimate. *Build. Environ.* 39, 1077-1086.

Gourlay, A., Bocher, E., 2011. Towards a WPS platform dedicated to an urban knowledge infrastructure. Presented at the INSPIRE Conference, Edimbourg.

Gros, A., 2013. Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier (Thèse de Doctorat). Université de La Rochelle, La

Rochelle, France.

Guillaume, G., Faure, O., Fortin, N., Junker, F., Aumond, P., Gauvreau, B., 2013. Recent developments in the transmission line matrix method and implementation – Application in a built-up environment. , Innsbruck (Autriche), . Presented at the Internoise, Innsbruck (Autriche).

Guillaume, G., Fortin, N., 2013. Optimized transmission line matrix model implementation for graphics processing units computing in built-up environment. J. Build. Perform. Simul. 0, 1–12. doi:10.1080/19401493.2013.864335

Guillaume, G., Fortin, N., Gauvreau, B., 2012. Numerical predictions for sustainable development of cities□: Acoustic propagation in presence of urban vegetation. Presented at the Internoise, New York City (USA).

Guillaume, G., Picaut, J., Dutilleux, G., Gauvreau, B., 2008. Use of the transmission line matrix method for the sound propagation modelling in open-spaces, in: Proc. 12th Long Range Sound Propagation Symp., Lyon (F), October 2008.

Huang, J., Akbari, H., Taha, H., 1990. The Wind-Shielding and Shading Effects of Trees on Residential Heating and Cooling Requirements. Presented at the ASHRAE Winter Meeting, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia.

Iovan, C., Boldo, D., Cord, M., 2007. Automatic Extraction of Urban Vegetation Structures from High Resolution Imagery and Digital Elevation Model, in: Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, 11-13 April 2007. pp. 1–5.

Irvine, M., Lagouarde, J.-P., Dayau, S., Brut, A., Solignac, P., Selves, J.-L., Cohard, J.-M., Najjar, G., Quentin, C., Rodriguez, F., Mestayer, P.G., 2011. Variations in Cn2 measured by LAS scintillometry over the city of Nantes during the FluxSAP 2010 measurement campaign. Presented at the 3rd Scintillometer Workshop, Wageningen, The Netherlands, p. Poster.

Irvine, M., Lagouarde, J.-P., Dayau, S., Cohard, J.-M., Najjar, G., Quentin, C., Rodriguez, F., Rouaud, J.-M., Mestayer, P., 2013. Decomposing sensible fluxes from two urban zones using LAS scintillometry over the city of Nantes during the FLUXSAP 2012 measurement campaign. Presented at the 4rd Scintillometer Workshop, Atmospheric Physics Symposium "Scintillometers and Applications," Tübingen, Allemagne, p. Document power point + abstract.

Jankowsky, S., 2012. Urban water balance and impact of water sensitive urban design on the catchment water balance (Rapport de post-doctorat VegDUD). IFSTTAR.

Kassouk, Z., Launeau, P., 2012. Application de la télédétection

hyperspectrale pour la cartographie de la végétation dans la ville de Nantes.

Kassouk, Z., Launeau, P., Roy, R., Mestayer, P.G., Rouaud, J.-M., Giraud, M., 2010. Urban mapping using hyperspectral Hypspx images over Nantes City, southern France. Presented at the IASIM-10, Dublin (Ireland).

Kassouk, Z., Launeau, P., Roy, R., Mestayer, P.G., Rouaud, J.-M., Giraud, M., 2014. Vegetation mapping in an urban area from the spectral analysis of airborne hyperspectral imagery. Artic. Soumis À Landsc. Urban Plan.

Kuo, F.E., Sullivan, W.C., 2001. Environment and crime in the inner city□: Does vegetation reduce crime? Environ. Behav. 33, 343–367.

Kurn, D., Bretz, S., Huang, B., Akbari, H., 1994. The Potential for Reducing Urban Air Temperatures and Energy Consumption through Vegetative Cooling. Presented at the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, American Council for an Energy Efficient Economy, Pacific Grove, California, p. 31.

Lagouarde, J.-P., Moreau, P., Irvine, M., Bonnefond, J.-M., Voogt, J.A., Sollicec, F., 2004. Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France). Remote Sens. Environ. 93, 443–462.

Lahme, E., Bruse, M., 2003. Microclimatic effects of a small urban park in a densely build up area: measurements and model simulations, in: ICUC5 Fifth International Conference on Urban Climate, 1-5 September 2003, Lodz, Poland.

Laverne, R.J., Winson-Geideman, K., 2003. The Influence of Trees and Landscaping on Rental Rates at Office Buildings. J. Arboric. 29, 281–290.

Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., Pearlmutter, D., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. Geosci Model Dev 5, 1377–1393.

Lepère, S., 2010. De la maison individuelle au logement collectif□: le jardin privé peut-il permettre de concilier les aspirations des ménages avec les préoccupations actuelles de densité urbaine□? (Mémoire d'initiation à la recherche). ensa Nantes.

Lepère, S., 2011. L'interaction entre les différents espaces extérieurs des opérations de logements denses, support de cohésion sociale (Mémoire de recherche). ensa Nantes.

Leveiller, T., Petit, G., Bocher, E., Long, N., 2013. Ontologies Et Nomenclatures (Rapport interne VegDUD (Livable)).IRSTV.

Long, N., Tonini, B., 2012. Les espaces verts urbains□: étude exploratoire des pratiques et du ressenti des usagers. VertigO - Rev. Électronique En

Sci. Environ. En Ligne 12. doi:DOI: 10.4000/vertigo.12931

Luley, C.J., Bond, J., 2002. A Plan to Integrate Management of Urban Trees into Air Quality Planning (Report prepared for New York Department of Environmental Conservation and USDA Forest Service). Northeastern Research Station.

Maché, M., 2012. Représentation multi-échelle des transferts entre couche de canopée urbaine et atmosphère à l'échelle de la ville (Thèse de Doctorat). Ecole Centrale de Nantes, Nantes.

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

Malys, L., 2012b. Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments (Ph. D. Thesis). Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France.

Malys, L., Musy, M., Inard, C., 2012. Microclimate and buildings energy consumption: sensitivity analysis of coupling methods, in: 8th International Conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment. Presented at the 8th International Conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment, Dublin.

Malys, L., Musy, M., Inard, C., 2014. A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Build. Environ.* 73, 187–197. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.012>

Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteorol.* 94, 357–397.

Mathieu, R., Freeman, C., Aryal, J., 2007. Mapping private gardens in urban areas using object-oriented techniques and very high-resolution satellite imagery. *Landsc. Urban Plan.* 81, 179–192.

McPherson, E.G., Muchnick, J., 2005. McPherson, E.G. and J. Muchnick. 2005. Effects of Street Tree Shade on Asphalt Concrete Pavement Performance. *J. Arboric.* 31, 303–310.

Mestayer, P., Rosant, J.-M., Rodriguez, F., Rouaud, J.-M., 2011. The experimental campaign FluxSAP 2010: Climatological measurements over a heterogeneous urban area. *Int. Assoc. Urban Clim.* 40, 25–33.

Mestayer, P.G., Rosant, J.-M., Rodriguez, F., Rouaud, J.-M., 2011. La campagne expérimentale FluxSAP 2010 - Mesures de climatologie en zone urbaine hétérogène. *La Météorologie* 73.

Musy, M., 2014. La ville verte - Les rôles du végétal en ville, QUAE. ed, Synthèses. Marjorie Musy, Versailles.

- Nowak, D.J., Crane, D.E., 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the {USA}. *Environ. Pollut.* 116, 381–389. doi:10.1016/S0269-7491(01)00214-7
- Nowak, D.J., Stevens, J.C., Sisinni, S.M., Luley, C.J., 2002. Effet of Urban Tree Management and Species Selection Effects on atmospheric carbon dioxid. *J. Arboric.* 28, 113–122.
- Perret, L., Dong, L., 2014. Characteristic of the flow over an urban to a vegetation terrain transition□: a wind tunnel study. Presented at the 21st Symposium on Boundary Layers and Turbulence, American Meteorological Society, Leeds, U.K.
- Perret, L., Ruiz, T., 2011. Structure of the flow above a vegetation canopy model.
- Petit, G., 2013. Modélisation de la base de donnée sur la Couverture du Sol (Rapport interne VegDUD). IRSTV, Nantes.
- Picaut, J., 2005. Application numérique du concept de particules sonores à la modélisation des champs sonores en acoustique architecturale. *Bull. Lab. Ponts Chaussées* 258-259 Thématique Méthodes Numér. En Génie Civ. 1, 59–88.
- Pigeon, G., 2007. Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOUL (Ph. D. Thesis). Université de Toulouse III.
- Rannou, P., 2012. Versionnement de l'information géographique dans une base de données relationnelles (Rapport de stage). IRSTV / Ecole Centrale Nantes.
- Robitu, M., 2005. Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain□: influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs (Thèse de Doctorat). Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes.
- Robitu, M., Inard, C., Groleau, D., Musy, M., 2004. Energy balance study of water ponds and its influence on building energy consumption. *Build. Serv Eng Res Technol* 25, 171–182.
- Robitu, M., Musy, M., Inard, C., Groleau, D., 2006. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Sol. Energy* 80, 435–447.
- Rodrigues, V., Calmet, I., Francis, M., Maro, D., Hébert, D., Connan, O., Laguionie, P., Maché, M., Piquet, T., Kéravec, P., Rosant, J.-M., 2013. Large-eddy simulation of flow and dispersion in an heterogeneous urban area: Comparaison with field data. Presented at the HARMO 15, Madrid, Espagne, p. Proceeding 129, 5p.

Rodrigues, V., Calmet, I., Maro, D., Maché, M., Hébert, D., Connan, O., Rosant, J.-M., 2012. Numerical and experimental tracer dispersion study for footprint assesement. Presented at the Eight International Conference on Urban Climate, Dublin, Irlande, p. Proceeding 88, 4p.

Rodriguez, F., Andrieu, H., Morena, F., 2008. A distributed hydrological model for urbanized areas. Model development and application to urban catchments. J. Hydrol. 351, 268–287.

Rodriguez, F., Morena, F., Andrieu, H., Raimbault, G., 2007. Introduction of innovative stormwater techniques within a distributed hydrological model and the influence on the urban catchment behaviour. Water Pract. Technol. 2, 757–764.

Rosant, J.-M., Sabre, M., 2014a. Anomalies de température de l'air mesurées sur plusieurs sites à Nantes (Rapport interne VegDUD). ECN -IRSTV / CSTB, Nantes.

Rosant, J.-M., Sabre, M., 2014b. Anomalies d'humidité de l'air mesurées sur plusieurs sites à Nantes (Rapport interne VegDUD). ECN -IRSTV / CSTB, Nantes.

Rousseaux, F., Bocher, E., Gourlay, A., Petit, G., 2012. Toward a coupling between GIS and agent simulation: USM, an OrbisGIS extension to model urban evolution at a large scale. Presented at the OGRS 2012, Yverdon les bains: Suisse.

Rousseaux, F., Long, N., Renouard, A., 2011. Vers une simulation de l'évolution des structures urbaines à partir d'une modélisation multi-agents. Vertigo - Rev. Électronique En Sci. Environ. En Ligne 11. doi:10.4000/vertigo.11561

Roy, R., Launeau, P., Mestayer, P.G., Andrieu, H., Rouaud, J.-M., Rodriguez, F., 2009. (2009) Airborne VNIR-SWIR hyperspectral remote sensing for environmental urban mapping, application to Nantes, France. Presented at the Ninth European Meteorological Society Annual Meeting (9th EMS / 9th ECAM), Toulouse (France).

Ruban, V., Rodriguez, F., Rosant, J.-M., Larrarte, F., Joannis, C., Mestayer, P.G., Andrieu, H., 2007. Hydrologic and energetic experimental survey of a small urban watershed, , 8pp, Lyon, 25- 28 Juin. Presented at the NOVATECH 2007, 6ème Conférence Internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, Lyon, p. 8.

Ruiz, T., 2011. Présentation de la base de données couplées pression/vitesse pour la canopée modèle «☐végétales☐» (Rapport de post-doctorat VegDUD).

Sabre, M., Normand, C., 2013. Systèmes de végétalisation des toitures et

façades - Règlementations et Normes (Rapport interne VegDUD). CSTB, Nantes.

Sandifer, S., Givoni, B., 2002. Thermal Effects of Vines on Wall Temperatures—Comparing Laboratory and Field Collected Data. SOLAR 2002. Presented at the SOLAR 2002, Annual Conference of the American Solar Energy Society, Reno, NV.

Scott, K., Simpson, J.R., McPherson, E.G., 1999. Effects of Tree Cover on Parking Lot Microclimate and Vehicle Emissions. . 25(3). J. Arboric. 25, 129–142.

Simpson, J.R., McPherson, E.G., 1998. Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento. Atmos. Environ. 32, 69–74. doi:10.1016/S1352-2310(97)00181-7

Szucs, A., 2013. Impact of Landscaping on Human Thermal Comfort. Case Study of a Canyon Street (Rapport de post-doctorat VegDUD).IRSTV / CERMA, Nantes.

Tavares, R., Calmet, I., Dupont, S., 2014. ARPS_VUC Model□: development and first application to homogeneous canopies (Rapport de post-doctorat VegDUD). LHEEA/IRSTV.

Teillet, A., 2011. Thermographie urbaine par télédétection□: analyse des températures de surface mesurées avec des caméras infrarouge aéroportées, détermination des diagrammes polaires de l'anisotropie directionnelle (Mémoire de stage M2 STEU). Ecole Centrale de Nantes.

Tonini, B., 2011. Usages et ressenti des habitants envers les espaces verts urbains collectifs (Rapport de post-doctorat VegDUD).

Tooke, T.R., Coops, N.C., Goodwin, N.R., Voogt, J.A., 2009. Extracting urban vegetation characteristics using spectral mixture analysis and decision tree classifications. Remote Sens. Environ. 113, 398–407.

Weihs, P., Staiger, H., Tinz, B., Batchvarova, E., Rieder, H., Vuilleumier, L., Maturilli, M., Jendritzky, G., 2012. The uncertainty of UTCI due to uncertainties in the determination of radiation fluxes derived from measured and observed meteorological data. Int. J. Biometeorol. 56, 537–555. doi:10.1007/s00484-011-0416-7

Xiao, Q., McPherson, E., Simpson, J., Ustin, S., 2007. Hydrologic processes at the urban residential scale. Hydrol. Process. 21, 2174–2188.

Xiao, Q., McPherson, E.G., Ustin, S.L., Grismer, M.E., 2000. A new approach to modeling tree rainfall interception. J. Geophys. Res. Atmospheres 1984–2012 105, 29173–29188.

Yilmaz, D., Sabre, M., Tétard, Y., 2012. Actual evapotranspiration measurement from experimental green roofs. Presented at the 8th

International Conference on Urban Climate, Dublin, Irlande, p. paper 124, 4p.