



HAL
open science

Modélisation climatique des façades végétales : caractéristiques radiatives des couvertures végétales de façades

Laurent Malys

► **To cite this version:**

Laurent Malys. Modélisation climatique des façades végétales : caractéristiques radiatives des couvertures végétales de façades. Architecture, aménagement de l'espace. 2009. dumas-00469774

HAL Id: dumas-00469774

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00469774v1>

Submitted on 2 Apr 2010

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

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



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



MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS

SPÉCIALITÉ AMBIANCES ET FORMES URBAINES

Année 2008/2009

THÈSE DE MASTER STEU

Diplôme cohabilité par :

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

Présentée et soutenue par :

Laurent Malys

le 24 septembre 2009
à l'École Nationale d'Architecture de Nantes

Titre :

**Modélisation climatique des façades végétales :
caractéristiques radiatives des couvertures végétales de façades**

Jury :

Examineurs	Francis Miguet Marjorie Musy Maéva Sabre	Professeur des ENSA, enseignant chercheur Ingénieur de recherche Ingénieur CSTB
------------	--	---

Directeur de mémoire : Laboratoire :	Marjorie Musy CERMA	Ingénieur de recherche
---	------------------------	------------------------

Résumé

Avec le réchauffement climatique global, l'effet positif de l'îlot de chaleur urbain dans les agglomérations au climat tempéré est remis en cause à long terme. La végétalisation des villes est une solution avancée pour réguler le microclimat urbain. Dans un contexte de densification urbaine, l'utilisation massive des enveloppes végétales de bâtiments, notamment sur les façades, est envisagée. Actuellement, L'outil de simulation du microclimat urbain développé au CERMA ne dispose pas de modèle adapté pour prendre en compte ces dispositifs et évaluer leur efficacité.

Après une étude bibliographique de la modélisation climatique des enveloppes végétales, il apparaît que les caractéristiques radiatives de courte longueur d'onde des couvertures végétales sont des paramètres décisifs pour déterminer leur comportement hygrothermique. Nous avons utilisé une représentation géométrique réaliste, à l'échelle de la feuille, afin de réaliser des simulations radiatives et de mettre en évidence les facteurs les plus déterminants. L'analyse statistique des résultats nous a conduits à développer un modèle physique simplifié permettant d'évaluer la transmittivité et la réflectivité d'une couverture végétale de façade en fonction de sa géométrie et des propriétés optiques de ses feuilles.

Mots-clés : végétation, façades végétales, propriétés radiatives, SOLENE.

Table des matières

Table des matières	5
Table des figures	7
Liste des tableaux	8
Introduction	9
I Modélisation des façades végétales	11
1 Les façades pour végétaliser la ville	13
1.1 Les enveloppes végétales dans le contexte de la climatologie urbaine	13
1.2 Typologie et historique de la végétation urbaine, aperçu	14
1.3 Typologie et historique des enveloppes végétales	18
2 Typologie des façades végétales	21
2.1 Définition d'une typologie	21
2.2 La végétation comme revêtement	22
2.3 La végétation comme brise-soleil	23
2.4 La végétation comme élément de paroi	24
3 État de l'art	29
3.1 Modélisation de la végétation à l'échelle urbaine	29
3.2 Modélisation fine des éléments architecturaux végétaux	31
3.3 Caractéristiques optiques des feuilles et des couverts végétaux . . .	36
II Caractéristiques radiatives des couvertures végétales de façade	43
4 méthodologie	47
4.1 Problématique	47
4.2 Analyse des paramètres	48
4.3 Analyse des effets	51
4.4 Conclusion	55
5 Simulations	57
5.1 Création de la géométrie	57

Table des matières

5.2	Étape d'initialisation	58
5.3	Déroulement de la simulation	60
5.4	Traitement des résultats	61
6	Exploitation des résultats	65
6.1	Approche statistique	65
6.2	Approche paramétrique	67
6.3	Approche physique	69
	Conclusion	77
	Bibliographie	81
A	Nomenclature	85
B	Logiciels utilisés	87
C	script de pilotage de SOLENE (bash)	89

Table des figures

1.1	Îlot de chaleur urbain	13
1.2	Les trois aimants, Howard, <i>Garden-Cities of Tomorrow</i> , 1898	15
1.3	Un urbanisme "vert"	16
1.4	Toitures végétales, d'hier et d'avant hier	18
1.5	Des nouvelles formes d'intégration du végétal	19
2.1	Revêtement de lierre grimpant	22
2.2	Extrait du catalogue Jakob	23
2.3	Protection solaire végétale	24
2.4	Mur végétal	25
3.1	Modélisation géométrique de l'arbre	30
3.2	Modèle de façade végétale [Zaiyi and Niu, 1998]	34
3.3	Modèle de rue canyon, différences finies [Alexandri and Jones, 2008]	35
3.4	Résultats des simulations de Alexandri and Jones [2008]	35
3.5	Caractéristiques radiatives d'une feuille, d'après [Guyot, 1999]	37
3.6	Répartition spectrale du rayonnement solaire	38
3.7	Évolution de la réflectivité du blé	38
3.8	Spectre de réflectance d'une feuille durant la sénescence	39
3.9	Facteurs de variation de la résistance stomacale [Oke, 1987]	39
3.10	Fréquences cumulées des inclinaisons des feuilles	40
4.1	Schéma des interactions entre les systèmes	47
4.2	Caractérisation de la répartition des feuilles : indice foliaire et taux de couverture	50
4.3	Distribution surfacique du rayonnement incident sur le mur	52
4.4	Calcul du rayonnement diffus	53
4.5	Répartition du rayonnement incident en fonction des différentes étapes de la simulation	54
4.6	Répartition du rayonnement incident sur le mur	54
4.7	Hypothèses sur l'influence des paramètres sur les effets	56
5.1	Rayonnement en fonction du choix du modèle	59
5.2	Traitement des effets de bords	59
5.3	Rayonnement en fonction du choix de l'échantillon	60
5.4	Schéma bilan du déroulement d'une simulation	62
6.1	Corrélation des résultats des régressions linéaires multiples	66

6.2	Corrélation transmittivité – différentes étapes du modèle paramétrique	70
6.3	Modèle couche en deux zones	71
6.4	Corrélation entre la transmittivité de la simulation et la transmittivité calculée pour le modèle en couches continues	72
6.5	Corrélation réflectivité – modèle couche	73
6.6	Modèle en couches à 4 zones	74
6.7	Corrélation pour le modèle en couches continues réparties	74

Liste des tableaux

2.1	Bilan des effets climatiques liés aux type de façade végétale	27
3.1	Synthèse des articles traitant des façades végétales	36
6.1	Bilan des résultats des corrélations	76

Introduction

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène microclimatique très préoccupant pour les grandes agglomérations, spécialement dans le contexte climatique des pays chauds. Il a été mis en cause pour ses conséquences sanitaires, notamment après la canicule de 2003, dont une part importante de la mortalité lui a été attribuée. Combiné avec le réchauffement climatique global, il va avoir un impact de plus en plus fort sur la consommation énergétique des bâtiments pour la climatisation, y compris dans les villes au climat tempéré.

La végétalisation des villes est une solution avancée pour lutter contre leur réchauffement local et du même coup contre le réchauffement climatique mondial par l'impact qu'elle pourrait avoir sur les émissions de gaz à effet de serre. Les plantes vont avoir plusieurs effets sur la consommation énergétique des bâtiments et sur le confort dans les espaces extérieurs :

- effets directs grâce, entre autres, au rôle de protection solaire,
- effets indirects, d'autre part, par la modification du microclimat.

Les avantages de la régulation du climat par la végétation sont nombreux : passive, a priori sans risque comparée à des solutions de haute technologie, favorisant la biodiversité et une meilleure gestion des écoulements pluviaux. . . , des arguments techniques et scientifiques auxquels nous ajouterons les plus-values esthétiques et psychologiques liées à la présence de verdure en milieu urbain.

Dans un contexte de densification urbaine, de lutte contre l'étalement urbain et de pression foncière élevée, la solution végétale pose un simple problème d'espace. C'est pourquoi on parle de plus en plus de mobiliser l'enveloppe des bâtiments et en particulier les toitures. Des mesures réglementaires en ce sens ont déjà été prises dans des villes méditerranéennes comme Barcelone. Une autre voie qui commence seulement à être étudiée est celle de l'utilisation des façades, mise au goût du jour par l'apparition de nouvelles solutions techniques comme les murs végétaux.

On manque néanmoins d'outils pour juger de l'efficacité des enveloppes végétales sur le microclimat, que ce soit à court terme, dans un cadre opérationnel ou d'un point de vue plus prospectif. Aujourd'hui, il n'est pas possible d'affirmer qu'elles peuvent effectivement jouer un rôle de régulation climatique comparable à celui des surfaces non urbanisées ou des arbres. Elles sont souvent étudiées pour la thermique du bâtiment, les effets positifs indirects du rafraîchissement passifs du microclimat dû à l'évapotranspiration n'étant pas pris en compte, ni le risque d'augmentation des charges de climatisation liées à l'augmentation de l'humidité relative de l'air. L'évaluation de ces phénomènes demande l'utilisation de modèles complets qui peuvent prendre en compte certains des couplages entre les com-

portements thermiques, radiatifs, aérauliques et physiologiques des plantes ainsi que leurs interactions avec le bâtiment et l'environnement proche.

Le modèle microclimatique du CERMA est développé pour intégrer ces coupages et évaluer l'effet de l'environnement proche sur le confort dans les espaces extérieurs et sur la consommation énergétique des bâtiments. Il ne dispose pas d'un modèle de paroi adapté pour traiter le cas des enveloppes végétales.

La première partie de ce stage de Master est une étude bibliographique sur la modélisation climatique des enveloppes végétales. Après avoir introduit le contexte de la modélisation microclimatique de la végétation urbaine, nous allons proposer une typologie des façades végétales, cette classification étant rendue nécessaire par la variété des solutions techniques employées et l'impact de ces solutions sur le choix de la modélisation. Ensuite, on détaillera les différentes études climatiques traitant des toitures, puis des façades végétales. Enfin, pour introduire la deuxième partie, nous présenterons plus précisément comment les aspects radiatifs courte longueur d'onde¹ sont pris en compte dans la modélisation de la végétation, ainsi que les facteurs externes pouvant affecter son comportement vis-à-vis du rayonnement solaire.

Comme on le verra dans cette première partie, les caractéristiques radiatives de courte longueur d'onde sont des paramètres décisifs pour évaluer l'amplitude des différents phénomènes hygrothermiques et aérauliques d'une couverture végétale. Ces valeurs sont souvent transposées directement d'après des modèles qui ne considèrent pas forcément des architectures végétales proches de ce que l'on peut trouver sur les couvertures de façades.

Le travail présenté dans la deuxième partie a pour objectif de pallier à ce manque de précision, et constitue une première étape dans la modélisation climatique complète d'une façade végétale. La méthode consiste à utiliser une représentation géométrique réaliste d'une couverture végétale afin de réaliser des simulations, puis à exploiter ces résultats pour déterminer un modèle simplifié permettant de prévoir les propriétés radiatives CLO des façades. Dans un premier temps, il s'agira d'étudier les différents paramètres à prendre en compte et les différents phénomènes radiatifs dont on cherchera à évaluer l'effet, cela afin de mettre au point une méthodologie. Dans un deuxième temps, le déroulement des simulations sera expliqué. Enfin, les résultats de la campagne de simulation seront analysés avec différentes approches avant de conclure sur la présentation d'un modèle simplifié d'évaluation des propriétés radiatives de couvertures végétales de façades.

¹CLO

Première partie

Modélisation des façades végétales

Chapitre 1

Les façades comme vecteur de végétalisation de la ville

1.1 Les enveloppes végétales dans le contexte de la climatologie urbaine

Avec le réchauffement global, l'effet positif de l'îlot de chaleur urbain dans les villes de climat tempéré est remis en cause à long terme. La végétalisation des villes, qui permet d'augmenter l'albédo des surfaces et l'absorption par évapotranspiration tout en limitant les dépenses énergétiques pour la climatisation, est considérée comme l'alternative la plus efficace pour limiter l'effet d'îlot de chaleur.

Îlot de chaleur et façade végétale

Plusieurs rapports techniques mettent en avant l'efficacité de la végétalisation de l'enveloppe des bâtiments par rapport à ces questions climatiques, tout en présentant les autres aspects positifs en terme d'ambiance, de biodiversité, de qualité de l'air, de gestion de l'eau... [Miller et al., 2004; Johnston and Newton,

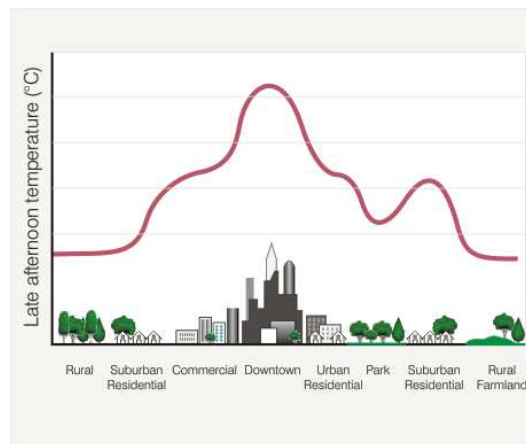


FIG. 1.1: Îlot de chaleur urbain

2004; Labrecque, 2007]. Ces documents encouragent la végétalisation de la ville en citant de nombreuses études scientifiques sur la végétation urbaine et sur les toitures végétales. Cependant, les références sur les façades végétales sont rares et traitent uniquement des questions de qualité de l'air, de biodiversité, d'isolation phonique, mais pas d'effet climatique.

Les enveloppes végétales : une interface

L'enveloppe d'un bâtiment joue le rôle d'interface entre l'environnement extérieur et l'environnement intérieur. Elle assure des conditions de confort acceptables malgré la variabilité des conditions météorologiques. Ainsi, la façade et la toiture d'un bâtiment sont souvent considérées uniquement du point de vue du climat qu'elles imposent à l'intérieur du bâtiment, leur effet sur les conditions extérieures ainsi que sur les bâtiments proches n'étant que très rarement étudié. Dans ce contexte, les enveloppes vont également jouer plusieurs rôles, en stockant une certaine quantité d'énergie thermique et en réfléchissant plus ou moins de rayonnement solaire vers les autres bâtiments par exemple.

Les solutions avancées pour éviter le stockage thermique dans les parois ou le piégeage radiatif dans les rues canyons, deux phénomènes liés à l'existence de l'îlot de chaleur urbain, ne sont pas parfaites. L'isolation par l'extérieur par exemple, empêche la chaleur de pénétrer dans la masse de la paroi, mais ce faisant provoque une augmentation de température très forte de la surface extérieure du mur¹, ce qui n'est pas forcément l'effet recherché. De même, l'utilisation de peinture "cool", fortement réfléchissante, pour les façades, peut ne pas être efficace si les surfaces des bâtiments en vis-à-vis ne sont pas également protégées. On retrouve dans ces exemples des illustrations de la manière dont on peut dégrader l'environnement thermique des constructions proches si les solutions ne sont étudiées que du point de vue d'un bâtiment isolé.

Les façades végétales présentent l'avantage de filtrer une partie du rayonnement solaire arrivant sur le mur sans en réfléchir trop vers les autres bâtiments, ni élever sa température de façon importante. Elles limitent à la fois les émissions de rayonnement infrarouge, dû à un échauffement des surfaces, et de rayonnement CLO dû à leur réflectivité solaire.

1.2 Typologie et historique de la végétation urbaine, aperçu

1.2.1 Campagne à la ville, ville à la campagne

Les termes de "végétation en ville" ou de "végétation urbaine" sont une association de deux notions à priori en opposition :

- le végétal, associé au monde rural, à la campagne et à un environnement "naturel", avec un pouvoir symbolique très fort : cycle des saisons, vie/mort,

¹Ce qui a d'ailleurs souvent provoqué des dégradations importantes des revêtements des premières façades isolées par l'extérieur, dans les années 1970, lui assurant du même coup une mauvaise publicité qui existe encore aujourd'hui



FIG. 1.2: Les trois aimants, Howard, *Garden-Cities of Tomorrow*, 1898

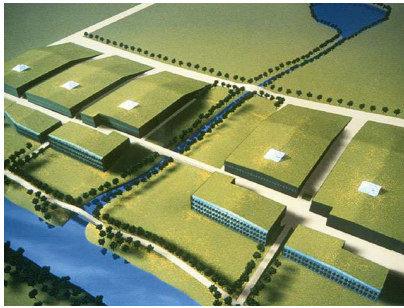
- l'urbain, associé au minéral mais dans lequel on peut également voir l'incarnation de l'acte technique, du progrès ou encore de l'artifice.

À propos des jardins et des parcs, on peut cependant nuancer cette opposition : la nature est domestiquée, contrôlée, façonnée par l'homme. Intégrée à la ville, la végétation devient à son tour un acte technique et un artifice.

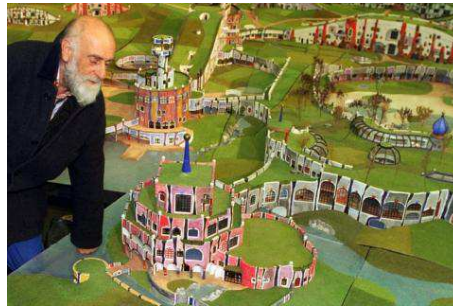
Historiquement pourtant, la ville et la campagne s'opposent. L'environnement artificiel créé par l'homme le protège de son environnement naturel, animal et végétal, qui lui est hostile. Très peu de place est laissée au végétal dans la cité médiévale. Il apparaît avec les premières promenades urbaines plantées qui correspondent au desenclavement des villes par la destruction des fortifications. À la fin du XIX^e, la création de parcs urbains se développe en France et à Paris, à l'image de ce qui se passe en Angleterre, puis atteint son apogée sous le second empire avec les travaux de Jean-Charles Adolphe Alphand, le paysagiste du baron Haussman, qui créera les principaux parcs parisiens. La question du végétal en ville va également être soulevée par les urbanistes utopiques et hygienistes. De ces mouvements très critiques à l'égard de la vie en ville, deux conceptions de la "désurbanisation" vont émerger², qui aboutissent chacun à une vision de la végétation :

- l'urbanisme culturaliste et les "cités-jardins" d'Ebenzer Howard avec une densité relativement faible, dans laquelle la végétation a une place importante : c'est la ville à la campagne. On peut y voir l'apparition des trames vertes (parc-boulevard parc circulaire de 150m de large).

²Françoise Choay, *L'urbanisme, utopies et réalités*, 1965



(a) Emilio Ambasz



(b) Hundertwasser

FIG. 1.3: Un urbanisme "vert"

Il y a, en réalité, non pas seulement comme on l'affirme constamment, deux possibilités – la vie à la ville et la vie à la campagne – mais une troisième solution, dans laquelle tous les avantages de la ville la plus active et toute la beauté et les délices de la campagne peuvent être combinés d'une manière parfaite.

Ebenezer Howard, *Garden-Cities of Tomorrow*, 1898

- Urbanisme progressiste et mouvement moderne avec une très forte densité et de grands immeubles laissant la place à la végétation au sol : c'est la campagne à la ville.

Soleil, espace, verdure.

Les immeubles sont posés dans la ville derrière la dentelle d'arbres. Le pacte est signé avec la nature

Le Corbusier, *Vers une architecture*, 1925

À partir des années soixante-dix, la présence de la verdure en ville et son intégration à l'architecture vont prendre une dimension différente avec l'apparition des préoccupations environnementales. Plusieurs courants incarnent alors une nouvelle architecture, en rupture avec le mouvement moderne et le style international. On peut en citer quelques représentants qui se sont particulièrement intéressés à la place du végétal dans l'architecture : Emilio Ambasz et James Wines (figures 1.3(b) et 1.5(b)) qui lance la revue et le groupe "SITE" ; l'artiste autrichien Hundertwasser (figures 1.3(b) et 1.5(a)), dans un registre un peu plus décalé ; Édouard François, plus récemment, qui collabore notamment avec Patrick Blanc.

1.2.2 Les différentes classifications du végétal urbain

Que ce soit pour l'étude microclimatique, pour son intégration urbaine ou architecturale, pour la gestion de l'eau ou son entretien, la végétation en ville ne peut pas être considérée dans son ensemble. Une classification est nécessaire, qui doit être adaptée à l'objet d'étude et qui peut donc prendre plusieurs formes. Un aperçu de ces différentes classifications permet de présenter un catalogue de toutes les

solutions de végétalisation, pour y situer plus exactement la place des façades végétales.

En fonction de l'échelle d'un ensemble de végétaux

Des parcs urbains, dont la superficie peut correspondre à celle d'une petite ville, aux jardinières de balcon, en passant par les squares, jardins, arbres d'alignement, enveloppes végétales, la végétation est présente à toutes les échelles de représentation de la ville. Que ce soit du point de vue climatique, de l'ambiance, de la gestion, le premier critère de classification qui peut venir à l'esprit est donc simplement la taille de la végétation.

Les différentes échelles de végétalisation ont notamment été étudiées du point de vue de la régulation du climat urbain : Pour rafraîchir la ville, vaut-il mieux de grands parcs urbains, des trames vertes, ou une végétation moins dense et mieux répartie ? C'est une des questions auxquelles les approches de la modélisation microclimatique des enveloppes végétales tentent de répondre.

En fonction de la forme d'un ensemble de végétaux

Le type de végétaux utilisé est un second critère qui n'est pas directement lié à l'échelle. On peut avoir une large étendue de gazon ou d'arbre. On pourrait définir trois types de végétaux en fonction de leur forme : l'herbe ou le gazon, le massif ou le buisson, et l'arbre ; on peut penser qu'on utilisera suivant le cas une surface (sans épaisseur), une couche ou un volume.

En fonction du type de sol

Le type de sol sur lequel la végétation va se développer prend une importance cruciale pour la gestion des eaux de ruissellement : en connexion directe avec le sol naturel, les eaux pluviales vont être évacuées facilement, mais elles ne seront pas traitées. Dans le cas d'un sol sans connexion ou même d'un sol artificiel (substrat), la végétation pourra faire office de réserve "tampon", très intéressante lors de fortes pluies.

On pourra distinguer trois types de sol :

- la terre végétale en connexion avec le sol naturel,
- la terre végétale sans connexion directe avec le sol naturel : jardinière, jardins sur dalle...
- les sols artificiels, substrats : toiture végétale extensive et murs végétaux.

En fonction du statut

Une dernière classification que nous pouvons présenter ici concerne les moyens d'action dont l'on peut disposer pour agir à l'échelle de la ville suivant qu'il s'agisse de végétation à caractère privé ou qu'il s'agisse de biens publics. Si les effets peuvent être similaires dans les deux cas, c'est au niveau de la gestion de ces espaces, en terme de coût et d'entretien que des différences importantes peuvent apparaître.



FIG. 1.4: Toitures végétales, d'hier et d'avant hier

1.3 Typologie et historique des enveloppes végétales

Parmi tous ces types de végétation urbaine, on peut distinguer la famille des enveloppes végétales, qui consistent à intégrer la végétation à l'architecture soit sur les surfaces horizontales (toitures végétales), soit sur les surfaces verticales (façades végétales). On ne confond pas les enveloppes végétales et les jardins (horizontaux et verticaux) car il s'agit bien de végétaliser des surfaces "enveloppes", c'est-à-dire à l'interface entre l'environnement intérieur et l'environnement extérieur.

1.3.1 Des jardins suspendus de Babylone...

Dès l'antiquité, on trouve des allusions à des toitures végétales au sens où les plantes poussent sur un sol qui n'est pas directement relié au sol naturel). Les jardins suspendus de Babylone, datant du VI^e siècle avant J.C., en sont une des premières apparitions historiques et la seule qui soit restée célèbre, bien que son existence ne soit pas avérée. De manière moins spectaculaire, les toitures végétales sont utilisées depuis longtemps dans l'architecture vernaculaire nordique et germanique pour leurs vertus de régulation du climat intérieur, notamment leur bonne résistance thermique. On retrouve l'utilisation de plantes grimpantes d'ornementation sur des supports artificiels à partir du XV^e siècle, faisant apparaître une forme d'architecture dans les jardins et les parcs. Elles sont également déjà utilisées pour réguler le climat autour de la méditerranée, notamment sous la forme des pergolas³.

Ce n'est qu'avec le progrès technique et l'utilisation courante du béton armé d'une part et l'apparition du mouvement moderne et des toitures terrasses d'autre part, que les toits jardins vont prendre leur essor. La végétalisation concerne alors les enveloppes des bâtiments des centres urbains, ce qui n'était pas le cas auparavant. On peut citer le paysagiste moderniste brésilien Roberto Burle Marx qui réalisa notamment des jardins suspendus pour Lucio Costa⁴ et Oscar Niemeyer, et qui est par ailleurs un précurseur de la création de jardins verticaux. Encore une fois, l'intégration architecturale de la végétation prend son envol dès que l'on

³ Jacques Leenhardt in Lambertini and Leenhardt, *Jardins verticaux dans le monde entier*, 2007

⁴ le ministère de la Santé et de l'Éducation, 1936-1943, sur des plans de Le Corbusier

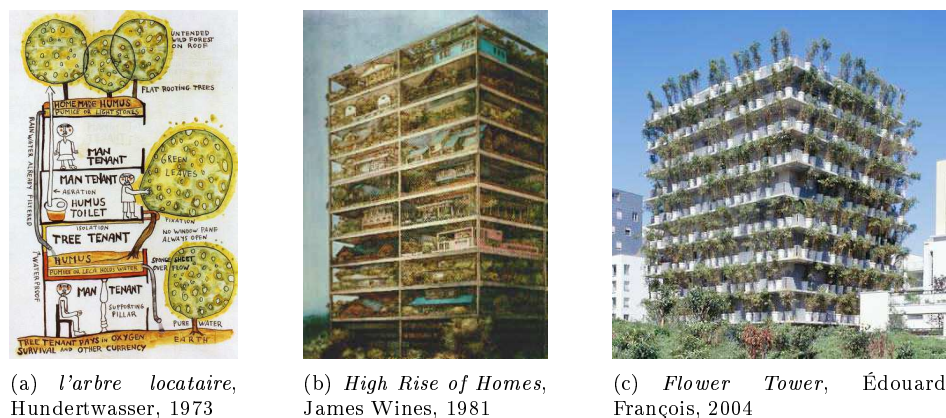


FIG. 1.5: Des nouvelles formes d'intégration du végétal

commence à prendre en compte les aspects environnementaux, c'est-à-dire après la crise pétrolière de 1973. Des solutions plus légères sont alors développées, distinguant les toitures végétales intensives (1 à 2 m de profondeur de substrat : terre végétale) et extensives (couche de substrat artificiel de 10 à 20 cm).

1.3.2 ... Aux murs végétaux de Patrick Blanc

Il faudra un certain temps pour que les techniques utilisées pour les surfaces horizontales soient applicable sur des surfaces verticales. C'est Patrick Blanc, botaniste au CNRS, qui va mettre au point la première technique de végétalisation de façade avec un sol artificiel. Ces véritables "tableaux végétaux" sont issues de ses travaux de recherche sur les sous-bois tropicaux. Observant que les plantes n'ont aucun problème pour pousser sur une surface verticale du moment que celle-ci est suffisamment saturée en eau, il utilise de la nappe horticole, un feutre de fibres synthétiques, fixée sur un support séparé du mur et arrosé de solution nutritive par un système automatique. Repéré lors du festival des jardins de Chaumont-sur-Loire en 1994, son travail sera d'abord popularisé par quelques réalisations architecturales et par des expositions, avant de connaître une reconnaissance mondiale qu'il doit en particulier à sa façade du musée du quai Branly réalisé par Jean Nouvel.

En parallèle, le mouvement de la *green architecture* et l'utilisation à la végétation se développent et on voit l'apparition de nombreux types de végétalisation des façades ou de surfaces inclinées. Les solutions techniques à l'image de celle du mur végétal de Patrick Blanc sont développées et se diversifient.

Chapitre 2

Typologie des façades végétales

Les études climatiques des façades végétales mettent en évidence plusieurs effets climatiques directs des façades végétales :

Effets radiatifs : les feuilles jouent le rôle de protection solaire pour le mur la journée mais empêche également le refroidissement en bloquant le rayonnement GLO de nuit. De par leur physiologie, les feuilles absorbent une quantité importante de radiations solaires sans élever leur température grâce à la transpiration. Enfin, la présence ou non d'un substrat humide peut également entraîner un refroidissement passif par évaporation.

Effets conductifs : la végétation et son substrat peuvent avoir un effet d'isolation et de stockage thermique.

Effets convectifs : les plantes limitent les transferts convectifs sur la surface extérieur du mur.

La modélisation climatique des façades végétales doit donc prendre en compte les paramètres radiatifs, en particulier le rayonnement solaire, les échanges thermiques infrarouges, le vent et l'humidité de l'air. Ces sollicitations auront un effet différent suivant le type de façade végétale.

2.1 Définition d'une typologie

Comme les toitures jardins, il existe différentes techniques pour végétaliser les façades, en fonction de l'existence ou non du substrat et de son type, de la constitution et la situation des éléments d'enveloppe par rapport aux murs et à l'environnement extérieur. La constitution de la façade végétale va avoir une influence importante sur son comportement climatique. Il convient donc de classer les différents types de murs végétaux par familles. La classification adoptée en distingue trois, en fonction du rôle joué par les éléments de végétalisation :

1. La végétation comme revêtement de façade
2. La végétation comme brise-soleil
3. La végétation comme élément de paroi



FIG. 2.1: Revêtement de lierre grim pant

2.2 La végétation comme revêtement

Pour les façades recouvertes de plantes grimpantes ou qui poussent sur un support proche de la paroi, on peut considérer que la végétation est utilisée comme revêtement extérieur d'éléments de façades opaques. Il s'agit des façades végétales les plus anciennes et les plus étudiées du point de vue climatique. Elles peuvent être constituées de plantes qui s'attachent directement à la paroi ou bien qui s'enroulent autour d'une grille ou de câbles supports. Elle se différencie de la végétation « brise-soleil » car on peut constater l'existence d'une couche d'air dans la canopée à une température différente de la température extérieure [Hoyano, 1988; Tsoumarakis et al., 2008].

De nombreuses familles de plantes peuvent être utilisées, qu'elles soient à feuillage caduc ou persistant, nécessitant ou non un support pour grimper. On peut en citer quelques unes parmi les plus couramment utilisées :

- le lierre grim pant (*hedera helix*), plante vivace à feuillage persistant,
- la vigne vierge (*parthenocissus*), plante vivace à feuillage caduc,
- les clématites (*clematis*), plante vivace, caduque ou persistante suivant les espèces,
- la glycine (*wisteria*), plante vivace à feuillage caduc
- ...

Il faut noter que l'on retrouve ces plantes aussi bien dans les façades végétales de type "revêtement" que de type "brise-soleil".

D'un point de vue climatique, deux effets principaux peuvent être observés : Premièrement, la végétation joue directement le rôle de masque solaire et protège la paroi du rayonnement solaire et infrarouge¹. Cette protection radiative s'applique également la nuit en bloquant les échanges infrarouges entre le mur et le ciel. Deuxièmement, on peut observer la création d'une couche d'air à une température différente de l'air extérieur, ceci grâce à la protection thermique et aéraulique que constitue le couvert végétal.

Du point de vue radiatif, la couverture végétale d'une façade peut être simplement définie par deux coefficients : la transmittivité et la réflectivité. Il s'agit donc d'adapter le modèle de surface équivalent et d'utiliser des caractéristiques radia-

¹les plantes sont complètement opaques au rayonnement infrarouge

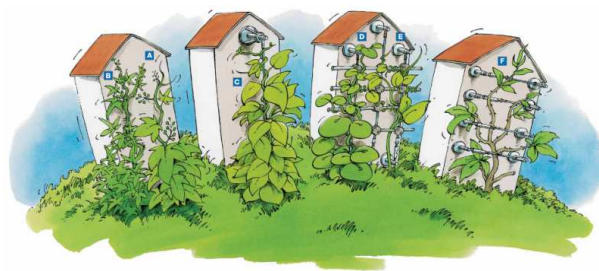


FIG. 2.2: Extrait du catalogue Jakob

tives différentes. Ces coefficients doivent être fonction de plusieurs paramètres qui peuvent évoluer dans le temps, comme les angles solaires et la disponibilité en eau.

Du point de vue hygrothermique, il va falloir faire un bilan thermique à la surface de la feuille. Il faut donc prendre en compte la capacité thermique et la transpiration des plantes, cette dernière étant également fonction de facteurs externes. Il s'agirait donc d'utiliser une couche qui se superposerait à celle du mur, et qui laisserait passer une certaine quantité de rayonnement infrarouge en fonction du taux de couverture végétale², et à laquelle on attribuerait une température équivalente correspondante à celle du feuillage. On prendrait en compte la production d'humidité de la végétation, celle-ci dépendant principalement de la résistance stomacale et du vent.

Enfin, la principale différence avec le deuxième type de façade végétale est la prise en compte des échanges convectifs, en particulier entre la face intérieure de la surface représentant la couverture végétale et le mur. En effet, l'existence d'une couche d'air de température différente à l'air ambiant entre les feuilles et le mur est dû aux échanges convectifs. La question est de savoir si l'on peut éviter l'utilisation d'un noeud d'air entre la couverture végétale et le mur. On peut penser qu'il suffirait d'adapter un coefficient d'échange prenant en compte à la fois les effets radiatifs GLO et convectifs entre ces deux éléments. Ceux-ci dépendent cependant du type d'écoulement qui se produit dans la lame d'air.

2.3 La végétation comme brise-soleil

Pour le deuxième type de façade végétale, que l'on appelle "brise-soleil", les plantes n'ont plus qu'un rôle radiatif (CLO et GLO). La différence avec le type précédent est que le support est cette fois écarté du mur ou de la fenêtre qu'il protège. Ce type d'enveloppe végétale permet de protéger des ouvertures transparentes comme les fenêtres sans qu'il n'existe de couche d'air isolante entre les feuilles. Des constructeurs de solutions de végétalisation proposent un large panel de grilles supports pour les plantes grimpantes [Miller et al., 2004; Jak]. La végétalisation comme protection solaire a été étudiée expérimentalement par Hoyano

²la végétation pouvant être considérée comme complètement opaque au rayonnement infrarouge



FIG. 2.3: Protection solaire végétale

[1988] (pergolas, plantes en pots).

Les phénomènes climatiques d'un brise-soleil végétal sont assez proches du type précédent : les effets sont les mêmes au niveau du rayonnement, mais différents du côté aéraulique car il n'y a pas de création d'une couche à une température différente, même si la présence de végétation va toujours avoir un effet sur l'écoulement de l'air et donc sur les échanges convectifs. Du point de vue radiatif, courtes et grandes longueurs d'onde, la seule différence pourrait être une asymétrie entre les coefficients optiques suivant que le rayonnement traverse la végétation dans un sens ou dans l'autre. Encore une fois, il faudrait faire un bilan thermique de la végétation pour lui assigner une température, et prendre en compte la production d'humidité dans le modèle aéraulique.

2.4 La végétation comme élément de paroi

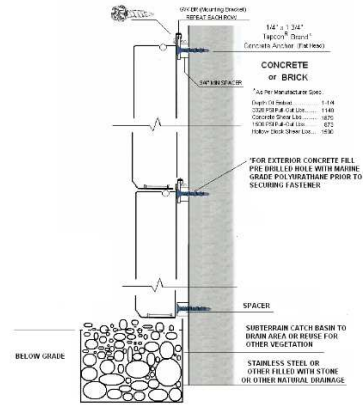
Le troisième type de façade végétale, plus récent, consiste à créer un sol artificiel vertical qui comporte un substrat humide pour la végétation, de la même manière que les toitures végétales. Appelés « murs végétaux » ou « murs vivants » (« living wall »), ils peuvent constituer un élément de paroi à part entière. Pour ces murs, il convient de prendre en compte les effets d'isolation et de stockage thermique. Aucune étude microclimatique n'a été réalisée sur ce type de façades.

Depuis l'"invention" du mur végétal par Patrick Blanc, de nombreux fabricants, souvent déjà engagés dans la fabrication de matériel de toiture végétale, ont mis sur le marché des produits aux caractéristiques très différentes. Celles-ci vont avoir une influence importante sur les effets thermiques des revêtements qui doivent être modélisés. On peut citer plusieurs systèmes constructifs :

- Le procédé "mur végétal" de Patrick Blanc est constitué de plusieurs couches de feutre géotextile (appelé "nappe horticole"). Elles sont agrafées sur une paroi plastique de quelques millimètres d'épaisseur. Le tout est plus ou moins écarté de la paroi de base, ce qui laisse la possibilité d'intercaler un isolant thermique.



(a) Patrick Blanc – Caixa Forum, Madrid



(b) coupe greenwall

FIG. 2.4: Mur végétal

- Le procédé "végétalis" utilise des cages d'acier remplies d'un substrat végétal : la sphaigne du Chili séchée. La structure modulaire permet de monter et éventuellement d'agrandir facilement une façade végétale, d'autant plus que les modules peuvent être végétalisés à l'avance.

A priori, les murs vivants sont une solution technique de haute technologie, puisqu'elles doivent incorporer des systèmes d'arrosage automatique avec pompe microdoseuse pour réaliser la solution nutritive. Il s'agit ni plus ni moins que d'une technique de culture hors sol, à l'image de ce qui est utilisé dans une certaine forme d'agriculture intensive (sauf qu'on ne cherche pas un rendement important ici). On dosera la solution nutritive dans des proportions permettant aux plantes de survivre, plutôt que de trop favoriser leur développement. Du point de vue de l'arrosage, on peut distinguer les murs vivants suivant que ceux-ci soient bouclés ou à eau perdue. Le premier type sera plus consommateur d'énergie, le deuxième un important consommateur d'eau.

Pour ces murs, les choses se compliquent sensiblement du point de vue climatique puisque le substrat va jouer un rôle thermique important :

- Il va plus ou moins renforcer la résistance thermique de la paroi d'autant plus que sa densité est faible et d'autant moins qu'il est chargé en eau.
- Il va jouer un rôle de stockage thermique important, d'autant plus qu'il est saturé en eau.
- L'évaporation de l'eau du substrat va s'ajouter à la transpiration des plantes
- l'eau du circuit d'arrosage, qui peut être à une température différente de l'environnement ambiant, va également rafraîchir ou réchauffer le substrat.

Cette fois, il paraît indispensable de prendre en compte l'inertie thermique de la façade par l'intermédiaire d'un ou plusieurs noeuds dans un modèle thermique

dynamique. Celui-ci serait superposé à la paroi et dépendrait fortement de nombreux paramètres. La question est de savoir s'il faudrait réaliser un modèle de sol pour caractériser la répartition et l'effet de l'eau d'arrosage dans le substrat. Dans ce cas, il faudrait prendre en compte la gravité dans les écoulements à travers le substrat, ainsi que le cycle d'arrosage.

Pour simplifier le problème, il s'agirait d'intercaler un ou plusieurs noeuds entre un modèle radiatif similaire à celui utilisé pour les deux autres types de façades. Ces noeuds comporterait un modèle de sol et un modèle thermique dont les résultats seraient couplés avec les caractéristiques radiatives et hydrauliques du feuillage, celles-ci étant fonctions des caractéristiques du sol.

radiatif	thermique	aéraulique	
protection fonction de la densité de feuillage	cavité d'air comme couche de protection	transferts convectifs avec la paroi limités	revêtement
protections des parois opaques uniquement	pas d'inertie thermique		
permet de protéger des ouvertures	aucun effet sauf radiatif pas d'effet de cavité		brise-soleil
protection totalement opaque	résistance thermique possibilité d'ajouter une couche d'isolant	plus ou moins d'évaporation	élément de paroi
dépend moins des saisons à cause du substrat	inertie thermique du substrat et du support	pas d'effet direct sur les échanges convectifs avec le mur	
protection des parois opaques uniquement			

TAB. 2.1: Bilan des effets climatiques liés aux type de façade végétale

Chapitre 3

État de l'art

3.1 Modélisation de la végétation à l'échelle urbaine

3.1.1 Les modèles microclimatiques

La minéralisation du sol et donc la diminution de la présence végétale est considérée comme une des principales causes de l'îlot de chaleur urbain. La modification du microclimat urbain par la présence de parcs a été mise en évidence à partir d'imagerie satellite, de thermographie, de simulation. Les modèles "green CTTC" [Shashua-Bar and Hoffman, 2002] ou "ENVI-met" ont notamment été développés dans cette optique.

De nombreuses études utilisent des modélisations climatiques des milieux urbains pour étudier l'effet de la présence de parcs et d'arbres en ville afin de calculer les effets indirects sur la consommation énergétique des bâtiments [Akbari et al., 2001; Giridharan et al., 2008] ou encore pour évaluer l'efficacité de politiques de réduction de l'îlot de chaleur urbain [Akbari and Konopacki, 2005].

3.1.2 Modélisation microclimatique des arbres

Les travaux de thèse successifs de Vinet [2000]; Robitu [2005]; Bouyer [2009], modélisent l'effet de la végétation dans des couplages thermo-aérodynamique de SOLENE avec des codes CFD. À partir des travaux de Robitu, dans SOLENE, la surface extérieure des couverts végétaux est modélisée comme une surface semi-transparente qui laisse passer une partie du rayonnement solaire et qui est opaque au rayonnement thermique. Les échanges thermiques avec l'air se font dans les cellules périphériques. Sur tout le volume de l'arbre, la résistance stomacale est constante et l'approvisionnement en eau assuré.

Au niveau des écoulements d'air, les cellules incluses dans le volume de l'arbre sont des puits ou des sources pour les grandeurs aérodynamiques. La spécificité du couplage SOLENE/CFD est de prendre en compte les interactions entre les effets thermiques et aérodynamiques par une approche itérative.

3.1.3 La modélisation des façades végétales dans le contexte de la modélisation des microclimats urbains

Les façades jouent un rôle prépondérant sur les ambiances urbaines en tant que récepteur de rayonnement solaire et émetteur de chaleur. En les recouvrant

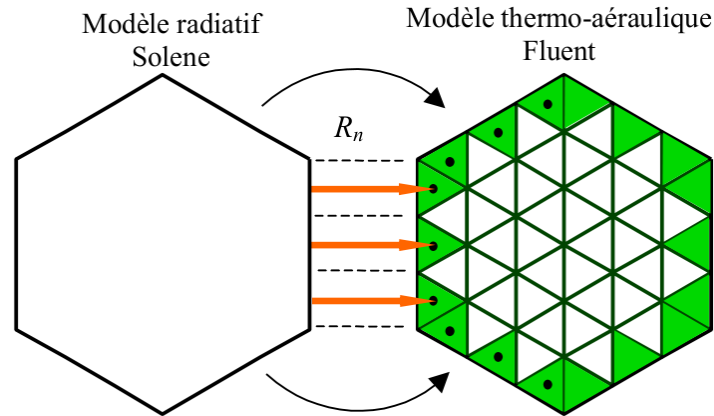


FIG. 3.1: Modélisation géométrique de l'arbre (les triangles colorés représentent les cellules où est distribué le rayonnement net)

de plantes, on modifie profondément leur comportement, notamment à cause de la transpiration des feuilles qui absorbe une grande partie du rayonnement incident.

À l'échelle de la ville leur effet est a priori moins déterminant, certains modèles se contentent même de ne prendre en compte que les surfaces de toit et de sol, à la manière de ce que l'on pourrait obtenir par télédétection. On se cantonne souvent à les prendre en compte par l'intermédiaire de la morphologie urbaine (rapport H/W , compacité...). En effet, si leur orientation et leur hauteur peuvent avoir un effet important, leur caractéristiques sont la plupart du temps sensiblement les mêmes du point de vue radiatif et thermique. Cependant, depuis le développement des peintures réfléchissantes d'une part, et des façades végétales d'autre part, la prise en compte de l'albédo des surfaces verticales devient nécessaire, en particulier si l'on cherche à connaître l'effet de l'utilisation de ces procédés à grande échelle sur le climat urbain [Rosenfeld et al., 1995].

Rosenfeld et al. [1995] étudie l'effet des peintures "Cool", mais pas de la végétation. Seul Alexandri and Jones [2008] cherche à considérer l'effet des façades végétales sur le climat urbain. Son modèle, comme tous ceux qui cherchent à évaluer l'effet de l'albédo des façades, fait cependant l'hypothèse que celui-ci est constant au cours du temps. Si cela se justifie pour les peintures, on peut le remettre en question pour la végétation du fait de son irrégularité géométrique et de la variation des propriétés radiatives des feuilles en fonction de paramètres externes (vent, disponibilité en eau, température ...).

3.2 Modélisation fine des éléments architecturaux végétaux

3.2.1 État de l'art sur la modélisation des toitures végétales

Pour la plupart, les auteurs présentant une modélisation hygro-thermique des toitures végétales citent les travaux Palomo [1998]. Dans cet article, l'auteur réalise une analyse de sensibilité sur les paramètres d'entrée d'un modèle complet de toiture végétale. Il en ressort que les paramètres décisifs pour améliorer le refroidissement passif dépendent principalement du choix des plantes, notamment de leur indice foliaire et de leur architecture foliaire.

Kumar and Kaushik [2005] et Alexandri and Jones [2007] utilisent des modèles de toiture assez proches. Alexandri and Jones [2007] développent une modélisation dynamique unidimensionnelle d'une toiture végétalisée et montrent l'importance de considérer l'effet thermique de la diffusion de la vapeur d'eau, compte tenu des différences de température importantes entre une surface ensoleillée et l'air ambiant. Il s'agit de bilan d'énergie sur chacun des éléments constituant une toiture végétale : structure support, sol, canopée végétale, et air. Ces bilans sont reliés par des méthodes de différences finies. Dans toutes ces modélisations, le vent est une donnée d'entrée produite par des simulations CFD qui sert à estimer les coefficients de transferts convectifs. L'interaction entre les surfaces végétales et les écoulements d'airs n'est pas prise en compte.

Schéma modélisation complète

Bilan énergétique de la canopée

bilan énergétique sur la végétation

$$(\rho c_p)_c d \times LAI \frac{dT_c}{dt} = \varphi_{rad,sol} + \varphi_{rad,TIR} + \varphi_{conv,p-a} + \varphi_{trans,p-a} \quad (3.1)$$

Dans ce bilan thermique, le terme de gauche représente la variation de l'énergie thermique stockée par les feuilles par sa masse thermique. Il s'agit d'une modélisation dynamique.

Le terme de droite se décompose de la manière suivante :

- $\varphi_{rad,sol}$: Le rayonnement solaire absorbé correspond au rayonnement incident auquel on retire ce qui est réfléchi (ρ_∞) et transmis à travers la végétation (τ_s) et auquel on ajoute la réflexion primaire sur le sol (ρ_g)

$$\varphi_{rad,sol} = [1 - \tau_s - (1 - \tau_s)\rho_\infty](1 + \tau_s\rho_g)\varphi_s$$

Ce terme est le plus important dans le bilan thermique, puisqu'il fait intervenir le rayonnement solaire, qui est la source d'énergie principale de la végétation. Les valeurs des caractéristiques radiatives peuvent donc être déterminantes, c'est pourquoi nous nous y intéresserons plus particulièrement dans la deuxième partie.

- $\varphi_{rad,TIR}$: Les échanges GLO dépendent de la température et de l'émissivité des corps environnants, c'est-à-dire le ciel au dessus et le sol au dessous.

$$\varphi_{rad,TIR} = (1 - \tau_1)[\sigma T_{sky}^4 + \sigma T_g^4 - 2\sigma T_p^4]$$

3.2 Modélisation fine des éléments architecturaux végétaux

- $\varphi_{conv,p-a}$: La convection entre les feuilles et l'air dépend de la résistance de la canopée r_e , de l'indice foliaire et de la différence de température

$$\varphi_{conv,p-a} = -2LAI \frac{\rho c_p}{r_e} (T_p - T_a)$$

- $\varphi_{trans,p-a}$: La transpiration prend en compte la résistance de la canopée et la résistance stomacale r_i , et dépend de l'écart de pression partielle de vapeur d'eau.

$$\varphi_{trans,p-a} = -2LAI \frac{\rho c_p}{\gamma(r_e + r_i)} (e_p - e_a)$$

Ces valeurs interviennent également dans les bilans énergétique et hydriques sur l'air de la canopée s'écrit :

$$(\rho c_p)_a L \frac{dT_a}{dt} = \varphi_{conv,a-p} + \varphi_{conv,a-g} + \varphi_{conv,a-\infty} \quad (3.2)$$

$$\rho_a L \frac{d\theta_a}{dt} = \varphi_{vap,a-p} + \varphi_{vap,a-g} + \varphi_{vap,a-\infty} \quad (3.3)$$

Modélisation du sol

Le sol est considéré comme un milieu poreux contenant de l'eau liquide et de l'air humide et dans lequel ont lieu des transferts de chaleur et de masse qui dépendent de la saturation en eau. Les auteurs prennent différemment en compte l'absorption d'eau par les racines.

Les modèles diffèrent suivant que le support soit considéré comme un solide homogène [Palomo, 1998; Kumar and Kaushik, 2005] ou comme un corps poreux dans lequel on va considérer les échanges hydriques et pour lequel on verra apparaître un terme source dans l'équation de la chaleur [Alexandri and Jones, 2007]. Les transferts thermiques et hydriques dans le support s'écrivent :

$$\frac{dT}{dt} = a_c \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\epsilon \lambda}{c_c} \frac{\partial q_c}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$\frac{dT q_c}{dt} = a_m \frac{\partial^2 q_c}{\partial z^2} \quad (3.5)$$

Les transferts thermiques et hydriques dans l'air contenue dans la porosité du support peuvent aussi être considérés et s'écrivent :

$$\frac{dT}{dt} = a_a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{(h_a - h_b)}{c_p \rho_a} + \left(\frac{c_1 - c_2}{c_p} \right) \left(D \frac{\partial q_a}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.6)$$

$$\frac{dT q_a}{dt} = D \frac{\partial^2 q_a}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho_a} I_1 \quad (3.7)$$

Modèle de toiture et de façade : quelles différences ?

Quels que soient les éléments végétaux à considérer, toutes les modélisations climatiques utilisent à peu près les mêmes démarches pour estimer la transpiration des plantes, basées sur une analogie électrique et les résistances hydrauliques des stomates et de la couche limite.

Dans la littérature, les modèles de façades végétales n'ont été appliqués qu'à des plantes grimpantes sans substrat. Il s'agit alors d'adapter la formulation de Palomo [1998] sans prendre en compte le sol, ce qui simplifie pas mal les choses. Mais est-il possible de transposer tel quel le modèle de sol à la vertical ?

Quelques différences peuvent être à prendre en compte entre la modélisation d'une toiture végétale et d'une façades végétales sont :

- L'invariance suivant le plan des toitures, parallèles au sol, est acceptable pour une toiture végétale en fonction de tous les paramètres environnementaux. Pour les façades, il paraît décisif de choisir ou non une invariance verticale, en particulier vis à vis du vent et de l'état hydrique du sol. Qu'en est-il de l'effet de la gravité sur les écoulements d'eau dans le sol ?
- Les échanges radiatifs GLO avec l'environnement urbain sont presque inexistantes pour les toitures végétales, ce qui n'est pas le cas pour une surface de mur.
- Les *LAI* données pour une certaine architecture foliaire ne sont pas forcément transposables directement pour des plantes poussant sur une surface verticale.

3.2.2 État de l'art sur la modélisation des façades végétales

Études expérimentales

Hoyano [1988] est un des premiers à avoir considéré la végétation comme un élément architectural de contrôle des ambiances. Dans son article « Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building », il instrumente plusieurs dispositifs végétaux de protection solaire et mesure leur effet sur le confort thermique. Cependant, comme Di and Wang [1999] et Eumorfopoulou and Kontoleon [2009], son étude se restreint à une courte période estivale, dans un contexte climatique chaud et sec. Ces deux études, quant à elles, s'intéressent à la réduction de la consommation de climatisation due à la présence de lierre. Tsoumarakis et al. [2008] utilisent une simulation TRNsys validée par deux campagnes de mesure (hivernale et estivale) pour estimer les économies de chauffage et de climatisation. Ils arrivent d'ailleurs à des résultats assez faibles, de l'ordre de 3% par mois d'économie d'énergie au mieux.

L'approche expérimentale ne permet pas de quantifier les effets indirects de la végétalisation des façades sur la réduction de l'îlot de chaleur urbain. Par ailleurs, les campagnes de mesures étant limitées, elle ne permettent pas d'intégrer les effets sur toute une année. Cependant, les mesures de la températures de feuillage et de l'air dans la canopée sont des données intéressantes pour concevoir un modèle thermique adapté et pour le valider partiellement.

Modélisation, simulation

À part Tsoumarakis et al. [2008] dont le modèle TRNsys n'est pas détaillé, Zaiyi and Niu [1998] et Alexandri and Jones [2008] sont les seuls à proposer des modélisations, qui sont similaires au modèle de toiture végétale utilisé par Palomo [1998].

Zaiyi and Niu [1998] réalisent une analyse de sensibilité de l'influence des caractéristiques d'une façade recouverte de lierre sur le flux thermique à travers le mur. Le modèle adopté considère trois couches d'air : l'air libre extérieure, l'air dans la canopée végétale et l'air dans la cavité de la grille support (voir fig. 3.2). Ces résultats montrent l'importance de la densité de feuillage, de la proportion de surface de mur couverte par les feuilles et de la largeur de la cavité entre le mur et la grille support.

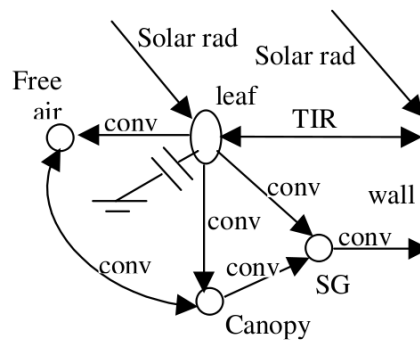


FIG. 3.2: Modèle de façade végétale [Zaiyi and Niu, 1998]

Alexandri and Jones [2008] mettent en place un modèle de rue canyon végétalisée couplé avec les logiciels ECOTECT pour le rayonnement solaire et Win4Air pour le vent (voir fig 3.3). Ils sont les seuls à considérer l'effet des façades sur le microclimat, notamment en fonction de la présence de toiture végétale, du ratio H/W , de l'orientation de la rue canyon et de l'orientation du vent. Surtout, les simulations sont réalisées pour huit climats différents. Cette fois, l'effet des façades végétales pour les climats tempérés (Londres), subarctiques (Montréal) et continental (Moscou) sont considérés. Il s'agit encore une fois de lierre grimpant.

Les résultats présentés concernent la température au niveau de la rue et au niveau des toits. Ils montrent ainsi que si les façades végétales ont un impact fort sur le confort des passants dans la rue, seules les toitures végétales permettent de limiter réellement l'îlot de chaleur au niveau des toits, donc au delà de la rue. Enfin, les simulations permettent de faire des estimations des consommations énergétiques des bâtiments pour la climatisation.

Les questions que l'on peut se poser par rapport à la modélisation sont les suivantes :

- Quelle représentation spatiale utiliser pour les phénomènes radiatifs et aérodynamiques abordés : couche sans épaisseur, couche avec épaisseur, multicouche ?
- Quelles invariances spatiales : modèle couche 1d, modèle 1d avec discrétisation suivant la hauteur et la largeur mais sans interaction transversales, invariance suivant la hauteur ?

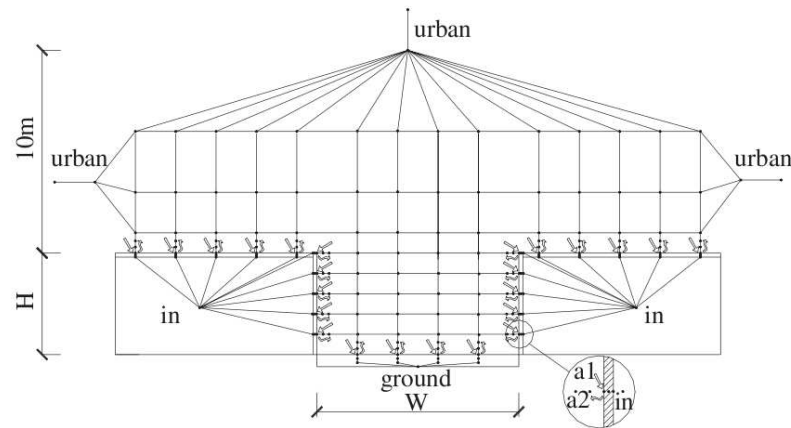


FIG. 3.3: Modèle de rue canyon, différences finies [Alexandri and Jones, 2008]

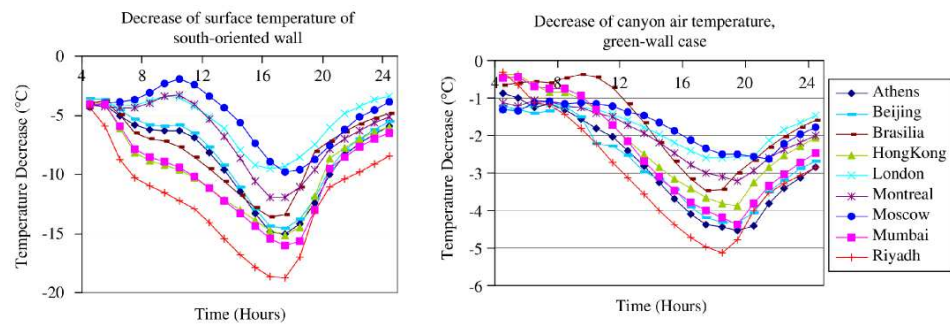


FIG. 3.4: Résultats des simulations de Alexandri and Jones [2008]

- Quels phénomènes physiques prendre en compte? Avec quelle finesse? Au niveau temporelle : modèle transitoire, instantané, évolution sur la journée, sur l'année (variation de la disponibilité en eau, de la quantité de feuillage, de la résistance stomatique...)?

Synthèse et analyse des résultats obtenus

Étant donnée la grande hétérogénéité des méthodes et des contextes d'étude, il est très difficile de comparer les résultats des différents travaux entre eux. Les résultats numériques présentés ne sont pas les mêmes pour tous les auteurs et il est difficile de savoir s'ils ont été estimés de la même manière.

La synthèse des différentes approches utilisés et une comparaison des températures est donné tableau 3.1.

Principalement, deux grandeurs sont considérées : la température et le flux thermique. Les résultats des analyses donnent parfois la température extérieure du mur avec ou sans végétation, la température du feuillage, la température intérieure du mur avec ou sans végétation, la température de l'air. Les flux thermiques sont

3.3 Caractéristiques optiques des feuilles et des couverts végétaux

article	contexte	orientation	in situ	simulation	énergie	microclimat	Température feuillage	T mur, avec	T mur, sans
Hoyano, 1988	Japon	o	x		x	x	33	28	46
Zaiyi, 1998	Hong Kong	nc		x	x				
Di, 1999	Chine	o	x	x				35	54
Eumorfopoulou, 2005	Grèce	e	x		x		35	34	43
Alexandri, 2008	variable	~		x	x	x			
Tsoumarakis, 2008	Grèce	o		x	x			40	43

TAB. 3.1: Synthèse des articles traitant des façades végétales

estimés sur surface intérieure ou sur la surface extérieure, en valeur maximale ou en valeur moyenne.

3.3 Caractéristiques optiques des feuilles et des couverts végétaux

Dans toutes les études traitant de la modélisation de toitures ou de façades végétales, la prise en compte des paramètres radiatifs des couverts n'est pas très poussée. Il sont la plupart du temps considérés comme constants, alors que plusieurs facteurs peuvent avoir une influence importante. C'est d'autant plus intéressant à prendre en compte que l'influence des caractéristiques radiatives du feuillage dans le calcul des autres grandeurs (évapo-transpiration, température) est également loin d'être négligeable.

Or, pour arriver à caractériser un couvert végétal, il faut prendre en compte les propriétés optiques des feuilles, qui subissent également l'influence de facteurs externes (disponibilité en eau, humidité), et aussi de paramètres propres comme les cycles de croissance.

3.3.1 Transmittivité et réflectivité d'une feuille

La modélisation du comportement radiatif du végétal à l'échelle de la feuille a d'abord été étudié par les agronomes dans le but de mieux cerner les phénomènes de croissance et la consommation d'eau. Plus récemment, la connaissance précise des échanges énergétiques au sein des couverts végétaux a été rendue nécessaire pour interpréter les données issues des satellites de télédétection [Guyot, 1999].

On s'intéresse aux propriétés optiques dans le spectre solaire, c'est-à-dire dans les longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 2,5 [μm]. La figure 3.5 représente ces propriétés pour des feuilles de blés. On y distingue trois domaines spectraux pour lesquels le comportement de la végétation va être différent. Si les amplitudes des

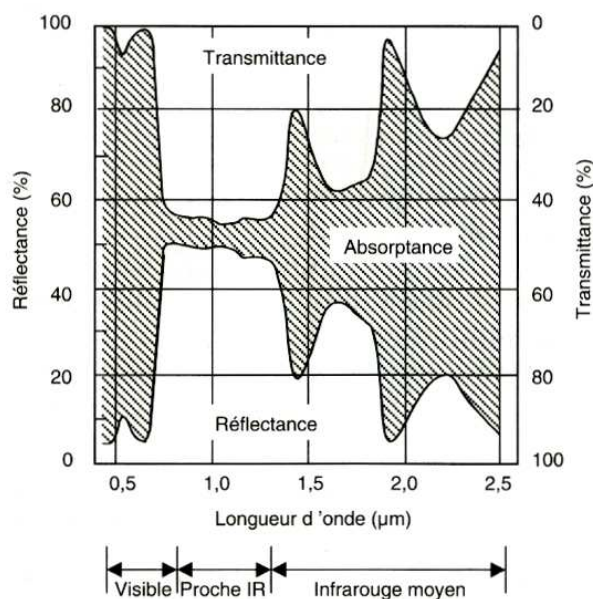


FIG. 3.5: Caractéristiques radiatives d'une feuille, d'après [Guyot, 1999]

variations de la transmittivité et de la réflectivité peuvent changer, les plages de longueurs d'onde restent identiques pour la plupart des végétaux.

- Dans le visible (0,4 – 0,7 [μm]) la plus grande partie du rayonnement est absorbé par les pigments foliaires dans les longueurs d'ondes rouges et bleus, qui correspondent aux chlorophylle a (bleu) et b (rouge), ainsi qu'au β carotène (bleu). C'est ce qui explique la couleur des feuilles, qu'elle soit verte lorsque la chlorophylle est active ou jaune, quand elle diminue : les propriétés optiques des feuilles varient donc en fonction du stress hydrique et de l'âge de la feuille.
- Dans le proche infrarouge (0,7 – 1,3 [μm]), les pigments foliaires n'interceptent plus le rayonnement qui est soit réfléchi soit transmis .
- Dans l'infrarouge moyen (1,3 – 2,5 [μm]) c'est l'eau présente dans les feuilles qui absorbe le rayonnement. Encore une fois, le stress hydrique va jouer un rôle important dans le comportement radiatif des couverts végétaux.

SOLENE n'étant pas fait à priori pour diviser le spectre en plusieurs bandes de longueur d'onde, on va utiliser des valeurs de réflectivité et de transmittivité moyennes, pondérée par la répartition de la puissance du rayonnement solaire.

$$\begin{cases} \tau_f = \frac{1}{I_0} \cdot \int_{\lambda=0,5}^{\lambda=2,5} (\tau_{f,\lambda}(\lambda) * I_{o,\lambda}(\lambda)) \\ \rho_f = \frac{1}{I_0} \cdot \int_{\lambda=0,5}^{\lambda=2,5} (\rho_{f,\lambda}(\lambda) * I_{o,\lambda}(\lambda)) \end{cases} \quad (3.8)$$

3.3 Caractéristiques optiques des feuilles et des couverts végétaux

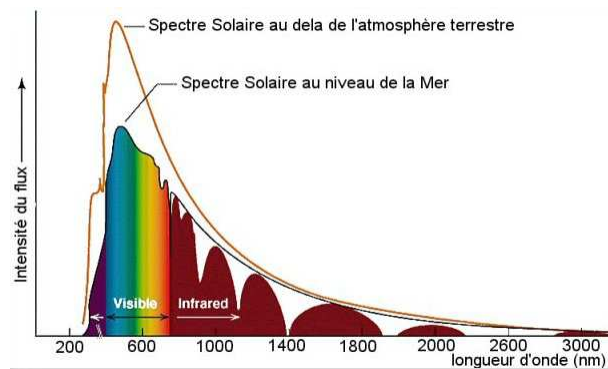


FIG. 3.6: Répartition spectrale du rayonnement solaire

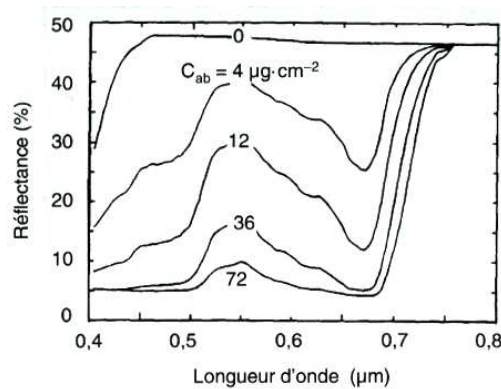


FIG. 3.7: Évolution de la réflectivité du blé en fonction du taux de chlorophylle [Guyot, 1999]

3.3.2 Facteurs de variation des caractéristiques optiques

Sur la figure 3.7, on peut remarquer que lorsque le taux de chlorophylle est faible, la réflectivité peut largement dépasser les valeurs généralement utilisées pour les surfaces végétales. Autant dire que la plupart des modèles climatiques considèrent une végétation « idéalisée ». Dans la réalité, de nombreux facteurs affectent sensiblement les propriétés radiatives des végétaux. Parmi ceux-ci, certains sont liés à la plante comme la structure anatomique de ses feuilles ou son âge, d'autres sont liés à des contraintes externes : teneur en humidité de l'air ou disponibilité de l'eau dans le sol, déficiences minérales, attaques parasitaires [Guyot, 1999]. Un phénomène qui est plus souvent pris en compte mais uniquement du point de vue de la transpiration est la modification de la résistance stomacale par les facteurs climatiques comme la température, le vent, le taux de CO_2 ... Or la variation de la quantité d'eau évaporée par la feuille entraîne soit un changement de température, soit une adaptation du coefficient d'absorption, et donc de la transmittivité et de la réflectivité.

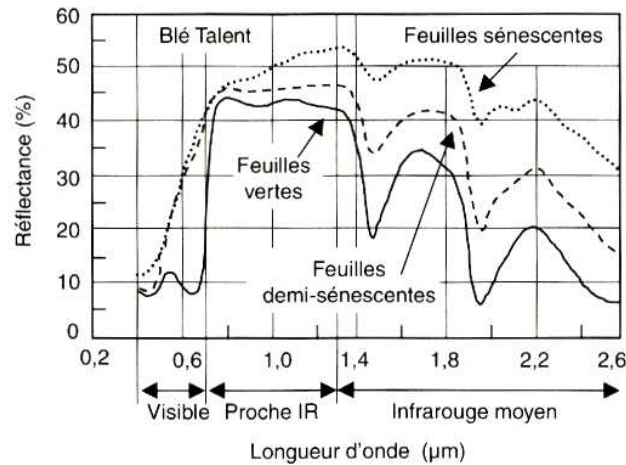


FIG. 3.8: Spectre de réflectance d'une feuille durant la sénescence [Guyot, 1999]

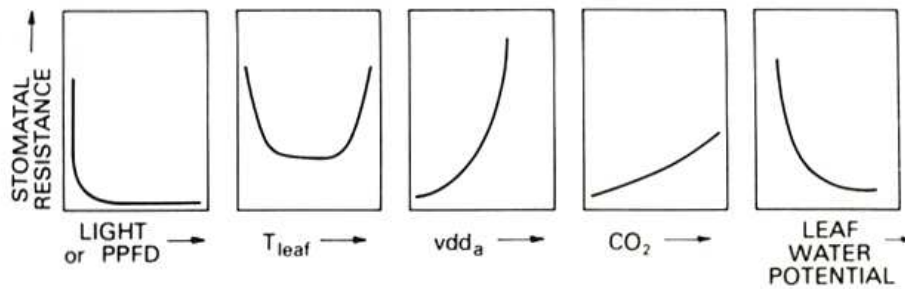


FIG. 3.9: Facteurs de variation de la résistance stomacale [Oke, 1987]

3.3.3 Couverts

Pour passer d'un modèle radiatif d'une feuille à celui d'un couvert végétal, il faut prendre en compte des paramètres géométriques des plantes. Pour l'instant, ces études ont surtout été réalisées soit pour des plantations, soit pour des arbres.

La variabilité de l'éclairement au sein d'un couvert étant très forte à cause des taches solaires, on va chercher à traiter des valeurs moyennes d'éclairement, avec un modèle d'absorption correspondant à la loi de Beer qui correspond à une atténuation proportionnelle à la distance parcourue par rayon solaire. Dans le milieu végétal, la différence est que ce parcours n'est pas donné en fonction d'une longueur mais de la quantité de feuille traversé. Par intégration, on obtient une loi exponentielle à deux paramètres : la densité de feuillage cumulée et un coefficient fonction de la distribution de l'inclinaison des feuilles :

$$E(z) = E(z_0) \cdot e^{-K_L \cdot LAI(z)} \quad (3.9)$$

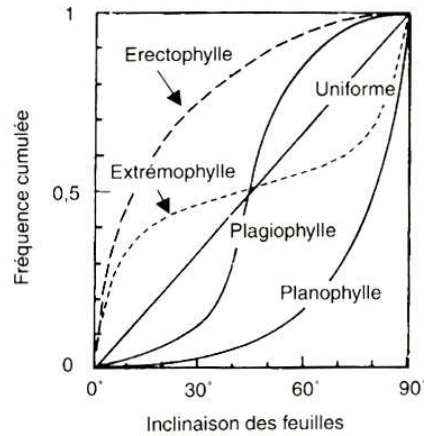


FIG. 3.10: Fréquences cumulées des inclinaisons des feuilles des 5 principaux types de couverts végétaux ([Guyot, 1999] adapté de [Wit, 1995])

avec $LAI(z)$ correspondant au cumul surfacique de la surface de feuille entre la hauteur z et le haut de la canopée. K_L , coefficient d'extinction, dépendant de la répartition angulaire des feuilles (voir figure 3.10).

Cette modélisation est celle qui est utilisée dans les modèles de toitures végétales présentés précédemment. Les valeurs du coefficient K_L sont propres à certaines architectures foliaires et se limitent à des densités foliaires relativement importantes par rapport à ce que l'on peut trouver sur une façade végétale.

Palomo [1998] utilise une expression du facteur K_L en fonction des propriétés optiques des feuilles d'un coefficient k_1 fonction de la répartition angulaire des feuilles :

$$K_L = \sqrt{\tau_f^2 - \rho_f^2} \cdot k_1$$

Ces formules sont valables pour une canopée considérée comme dense, c'est-à-dire couvrant entièrement le mur. C'est la raison pour laquelle elles ne sont pas forcément directement applicables pour les façades végétales que nous avons traitées par la suite.

Conclusion de la première partie

Après avoir présenté un aperçu de l'histoire de la végétation urbaine et des procédés de végétalisation des enveloppes de bâtiments, puis identifié le contexte microclimatique des façades végétales (notamment en fonction de leur typologie), nous avons détaillé les modèles qui traitent de façades et de toitures végétales. Puis nous avons présenté succinctement la manière dont les propriétés radiatives sont considérées en agronomie et en climatologie. Ainsi, nous avons vu que la transmittivité et la réflectivité des couverts végétaux sont décisifs pour caractériser le comportement hygrothermique des enveloppes végétales.

Par la suite, il s'agira de combiner ces connaissances du comportement climatique et radiatif de la végétation avec un modèle d'architecture de plante et l'outil de simulation d'échanges radiatifs du CERMA, SOLENE, afin de trouver un moyen de caractériser simplement les propriétés CLO des couvertures végétales de façades.

Deuxième partie

Caractéristiques radiatives des couvertures végétales de façade

Introduction de la deuxième partie

Les effets ressentis et mesurés de la végétation sur l'environnement urbain sont le transfert d'énergie thermique (rayonnement infrarouge et convection) et la production d'humidité, phénomènes physiques dont la principale source d'énergie est le rayonnement solaire. Par rapport à l'ambiance intérieure et à la consommation énergétique d'un bâtiment, elle va également jouer le rôle d'écran en transmettant plus ou moins de ce rayonnement au mur qui la supporte. Sa réaction à cet apport énergétique peut être représenté par deux paramètres adimensionnés qui sont la transmittivité et la réflectivité.

Ces coefficients sont les principales caractéristiques des parois à renseigner dans les modèles radiatifs CLO, ceux-ci permettant ensuite d'évaluer les effets hygro-thermiques de la façade. Comme on a pu le voir dans la partie 3.2.1, la modélisation complète d'une surface végétale est complexe puisqu'elle fait intervenir de plusieurs phénomènes physiques qui peuvent être couplés. Le choix des caractéristiques radiatives de départ va fortement conditionner les résultats sur le comportement hygro-thermique de la couverture végétale.

À cause des inter-réflexions, les rayonnements énergétiques et lumineux dans un couvert végétale doivent être traités comme un système complexe : son comportement global ne peut être déduit de celui de chaque composant élémentaire que constituent ses feuilles. Les caractéristiques optiques de ces éléments ne sont donc qu'un paramètre d'entrée du modèle parmi d'autres, notamment liés à la géométrie. En première approche, l'effet de chacun de ces paramètres peut être assez facile à prévoir. Cependant, si l'on considère leurs dépendances et les effets combinés tels qu'ils existent dans la nature, et si l'on cherche à les quantifier, une étude numérique est indispensable.

Dans un premier temps, il s'agit donc de déterminer les paramètres à prendre en compte dans le modèle physique. Pour cela, on s'appuiera sur une analyse détaillée de certains résultats préliminaires. Il s'agira ensuite de mettre au point une procédure de simulation plus détaillée qui prenne en compte ces facteurs et permette d'en évaluer l'effet. Dans la dernière partie, les résultats seront exploités afin de mettre en évidence les paramètres qui ont un effet prépondérant sur les propriétés optiques de la façade et de développer un modèle physique simplifié permettant de prévoir son comportement.

Chapitre 4

méthodologie

4.1 Problématique

Dans le contexte de la modélisation climatique à l'échelle urbaine, nous devons faire face à la fois à un emboîtement des échelles et à des couplages physiques importants entre les différents phénomènes qui entrent en jeu. Notre objectif est de proposer un modèle radiatif des façades végétales qui s'intègre dans une modélisation microclimatique à l'échelle du quartier. Afin que le modèle final reste maniable, il faut que chacun de ses composants reste également assez léger. On dispose de moyens très précis de décrire ce qui se passe à petite échelle, mais il n'est pas envisageable de les intégrer tel quel dans un modèle physique à l'échelle urbaine. Il va donc falloir les simplifier tout en gardant une représentation correcte des paramètres. Or, toute simplification implique une perte d'information et de précision. On va chercher à modéliser le plus fidèlement possible les propriétés radiatives macro des façades vertes en limitant le nombre de paramètres à prendre en compte.

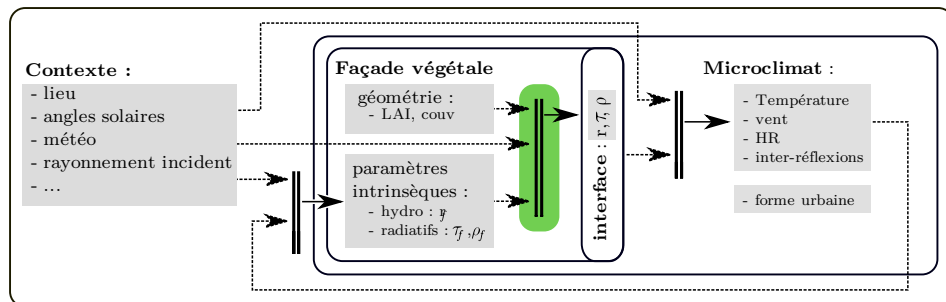


FIG. 4.1: Schéma des interactions entre les systèmes

Question

Comment réaliser un modèle simplifié qui permette à la fois de caractériser les effets radiatifs d'une couverture végétale de façade et d'étudier les interactions entre ces caractéristiques et son environnement urbain ?

Hypothèses de base

Notre modèle simplifié doit répondre à trois contraintes :

1. Il doit tant que possible limiter le nombre de facteurs de contexte à prendre en compte. En particulier, on veut pouvoir l'utiliser quelles que soit la situation géographique et l'orientation de la façade. Cela induit que le modèle soit paramétré par des facteurs qui ne font pas le lien entre le lieu et le temps. Par exemple, si l'on caractérisait l'effet de la façade en fonction de la date, et de l'heure, le modèle ne serait applicable que pour une latitude donnée, car les relations entre les angles solaires et la répartition des rayonnements directs et diffus lui sont propres. À l'inverse, en utilisant de manière découplée les angles solaires d'une part, et le taux de rayonnement diffus d'autre part, on peut appliquer le modèle quel que soit le lieu géographique.
2. Il doit permettre de caractériser simplement une couverture végétale, avec des paramètres globaux que l'on peut soit estimer visuellement, soit prévoir en fonction de modèles de croissance de plantes.
3. Il doit prendre en compte les interactions supposées entre l'environnement et la végétation. C'est-à-dire qu'il doit considérer des paramètres tels que la transmittivité et la réflectivité des feuilles, qui varient en fonction de la disponibilité en eau, de la température et d'autres facteurs externes.

Afin de résoudre le problème, nous allons chercher à vérifier la pertinence de quelques hypothèses de base :

1. Les paramètres de contexte liés au temps et à l'espace peuvent être découplés : les caractéristiques radiatives ne dépendent pas de l'orientation de la façade et on peut adimensionner le problème par l'intermédiaire d'un taux de rayonnement diffus et de la hauteur solaire.
2. Il est inutile de connaître les distributions des angles et des tailles de feuilles.

4.2 Analyse des paramètres

Le choix des indicateurs que l'on peut utiliser pour caractériser la végétation est vaste. On peut les classer dans trois familles dans lesquelles ils convient d'en dégager les plus significatifs.

4.2.1 Paramètres géométriques

Dans une première approche, on peut considérer les paramètres géométriques propres à une feuille d'arbre :

- sa forme dans le plan : nous utiliserons des triangles, mais en réalité les feuilles de lierre sont plus complexes,
- sa forme dans l'espace : plat ici (simplification),

- sa taille,
- son orientation, définie par les 3 angles dans l'espace : azimut, hauteur, roulis.

Ensuite, il faut considérer les feuilles dans leur ensemble :

- leur nombre ou leur densité, surfacique ou volumique,
- leur répartition dans l'espace,
- la distribution de leur taille,
- la distribution de leurs orientation dans l'espace.

Il apparaît que le nombre de facteurs qui entrent en jeu est important et que, s'il peuvent être utilisés comme variables dans la simulation, on ne pourra pas tous les garder pour caractériser simplement une façade. Certains ne seront donc simplement pas pris en compte, d'autres seront rassemblés dans un ou plusieurs indicateurs.

Indice foliaire

D'après plusieurs études sur les couverts végétaux des toitures végétales, le paramètre le plus souvent utilisé est l'indice foliaire, ou *LAI*, qui représente la surface de feuille pour une surface de sol donné (dans le cas où l'on cherche à caractériser un couvert horizontal). C'est donc une densité surfacique de surface. Il paraît plus adapté que le *LAD* (densité foliaire), qui est une densité volumique de surface utilisée pour caractériser les arbres.

Le *LAI* peut être calculé à partir de plusieurs paramètres. Il dépend en particulier du nombre de feuilles, de leur surface. On peut ensuite considérer un *LAI* brut ou bien en projection sur la surface du mur. On fera alors intervenir les angles d'orientation des feuilles. On peut encore utiliser un *LAI* plus complexe en projetant la surface des feuilles sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire direct, on verra par la suite pourquoi il est pertinent pour illustrer le phénomène, bien qu'il soit trop compliqué à utiliser dans la pratique.

Taux de couverture

Un autre paramètre apparaissant dans la bibliographie est le taux de couverture de feuillage [Zaiyi and Niu, 1998]. Il est défini comme le rapport entre la surface couverte par les feuilles et la surface total. Il est donc compris entre 0 et 1 et reste un paramètre plus englobant que le *LAI*. Il permet de mieux prendre en compte la répartition. Il est pertinent de l'utiliser lorsque la couverture est peu dense, ce qui est souvent le cas pour les façades végétales.

De la même manière, on peut utiliser un taux de couverture fonction des angles solaires qui donnerait la surface de l'ombre portée sur le mur. On peut même envisager un taux de couverture par nombre de transmission, qu'il n'est pas très difficile de calculer à l'aide du modèle, mais qui demande de connaître trop précisément la répartition du feuillage pour être utilisé dans la réalité.

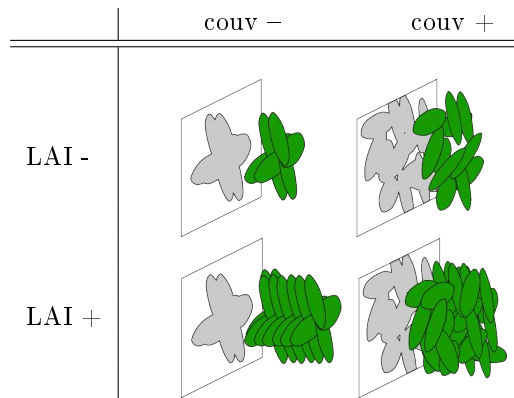


FIG. 4.2: Caractérisation de la répartition des feuilles : indice foliaire et taux de couverture

Relation entre indice foliaire et taux de couverture

Comme on le voit sur la figure 4.2, ces deux paramètres géométriques sont complémentaires. A priori, il n'y a pas de relation directe entre eux, même s'ils vont suivre une même tendance. Avec notre modélisation géométrique complètement aléatoire, on va cependant avoir une forte corrélation entre les deux paramètres, ce qui constitue une limite importante de notre modèle géométrique.

4.2.2 Paramètres intrinsèques

Les paramètres intrinsèques sont ceux liés aux caractéristiques physiques des feuilles ou du mur support. Les paramètres globaux que l'on cherche à obtenir existent déjà à l'échelle de la feuille. Ils ont été beaucoup étudiés de façon expérimentale afin d'obtenir des lois qui dépendent particulièrement de la longueur d'onde du rayonnement. Ces paramètres intrinsèques dépendent également de nombreux facteurs externes (voir partie 3.3.1). Ils ne sont pas considérés ici, puisqu'ils sont justement utilisés comme paramètres d'entrée du modèle afin de pouvoir prendre en compte ces facteurs externes par leur intermédiaire.

L'albédo du mur est également considéré dans le calcul du taux de réflexion, mais pas pour la transmittivité (fixé à 0, 2) car son effet peut être considéré comme négligeable.

Le rayonnement incident sur la feuille est aussi un facteur qui joue sur le taux d'absorption. Il y a donc une corrélation entre les paramètres intrinsèques et les paramètres de contexte qui ne sont pas pris en compte dans cette étude.

4.2.3 Contexte

Encore une fois, les paramètres de contexte sont nombreux et doivent être synthétisés. Il s'agit de tout ce qui est extérieur au système, en particulier lié au

rayonnement solaire.

À priori, on pourrait considérer différent type de facteurs :

- date,
- lieu,
- orientation,
- type de ciel

Cherchant à caractériser une façade végétale indépendamment de son environnement, le contexte urbain n'est pas considéré dans premier temps¹.

En réalité, il paraît compliqué de déterminer des lois en fonctions des paramètres précités, puisque chaque combinaison de lieu et de date est particulière. On peut se limiter à 3 paramètres qui synthétisent tous les autres et qui peuvent se calculer facilement :

- angles solaires relatifs : hauteur solaire, azimut solaire par rapport au mur
- taux de rayonnement direct
- rayonnement incident total

4.2.4 Des interactions existent...

Chaque famille de paramètres va être fixé indépendamment des autres afin de déterminer la réaction de la végétation à différentes sollicitations. Dans la pratique, ces familles peuvent être liées entre elles. Par exemple, la capacité de la plante à absorber de la chaleur par transpiration dépend de plusieurs paramètres externes : température, taux de CO₂, vent. Les paramètres optiques intrinsèques des feuilles varient donc en fonction du contexte.

De la même manière, la forme des feuilles ou plus particulièrement leur orientation peut dépendre de l'angle d'incidence solaire, les feuilles s'adaptant naturellement à une position dans laquelle elle récupère le maximum d'énergie.

4.3 Analyse des effets

Le rayonnement incident après inter-réflexion peut s'écrire comme la somme de trois termes :

$$E = E_{dir} + E_{dif} + E_{inter} \quad (4.1)$$

Une bonne manière de comprendre les effets de chacun des paramètres est d'observer le résultat de chaque étape de la simulation en terme de répartition du rayonnement incident sur le mur. Les graphiques de la figure 4.3 représente ainsi les distributions du rayonnement issue de chaque étape de la simulation, à une heure donnée, pour trois cas avec une orientation et des caractéristiques optiques différentes.

4.3.1 Répartition du rayonnement solaire direct

C'est a priori la partie la moins complexe à calculer. Le mur reçoit un flux radiatif direct en provenance du soleil sous forme de rayons parallèles. Chaque

¹On verra qu'on peut le prendre en compte par l'intermédiaire du taux de rayonnement diffus

4.3 Analyse des effets

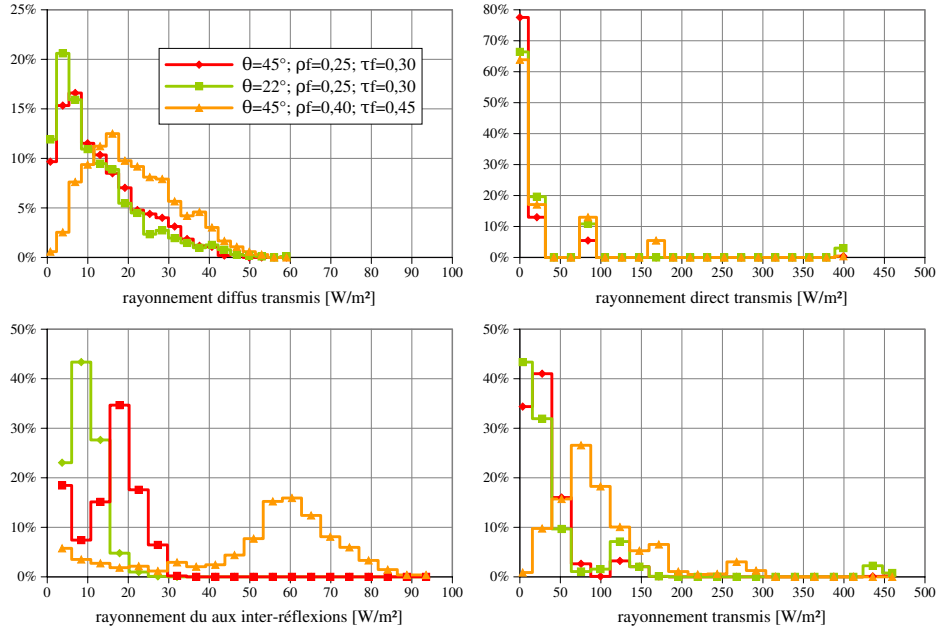


FIG. 4.3: Distribution du rayonnement incident sur le mur sous forme d'histogramme, le 6 juin à 14H00, en fonction de l'angle d'inclinaison des feuilles (θ) et des propriétés radiatives des feuilles (ρ_f , τ_f)

rayon peut être intercepté par une ou plusieurs feuilles qui vont absorber, réfléchir et transmettre une partie de l'énergie incidente. Ainsi, pour chaque point du mur, le flux direct incident s'écrit en fonction du nombre de transmissions n , du taux de transmission d'une feuille τ_f et du flux incident I_0 :

$$E_{dir} = I_0 \cdot \tau_f^n$$

En observant la répartition surfacique du rayonnement direct transmis (figure 4.3), on voit bien l'effet d'une et de plusieurs transmission et l'importance de la répartition des feuilles. Si on somme le rayonnement reçu par chaque facette ou qu'on en fait la moyenne surfacique, on voit que l'on peut facilement adimensionner le problème en divisant par le rayonnement solaire direct incident sur une surface verticale :

$$E_{dir,tot} = \frac{I_0}{S} \cdot \sum_i (S_i \cdot \tau_f^i)$$

4.3.2 Rayonnement en provenance du ciel

Le rayonnement en provenance du ciel, ou rayonnement diffus, est provoqué par la diffusion du rayonnement solaire par les particules contenues dans l'atmosphère. Chaque point du mur va donc recevoir un rayonnement en provenance des

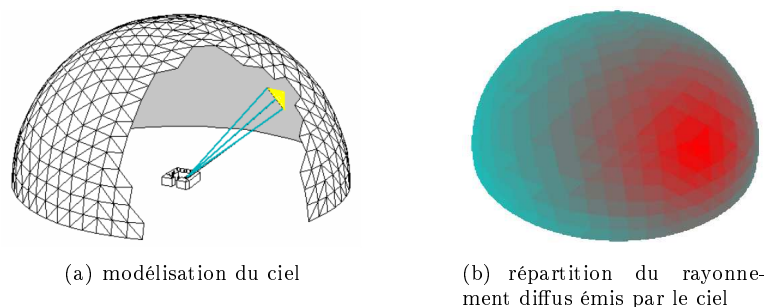


FIG. 4.4: Calcul du rayonnement diffus

différentes parties du ciel visible.

Dans le modèle utilisé, on utilise un ciel clair type CIE, basé sur le modèle de Perez dont les coefficients sont :

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 6,3 \\ \Delta &= 0,12\end{aligned}$$

Il s'agit d'un ciel clair dans lequel la répartition du rayonnement diffus sur le modèle géométrique de ciel (un hémisphère géodésique à 256 facettes) représente une tache solaire autour de la position du soleil. La quantité d'énergie reçue par chaque partie du ciel dépend de la position du soleil et de la saison. Le choix d'un ciel clair se justifie par le fait qu'on s'intéresse au cas où la quantité d'énergie solaire est importante, défavorable du point de vue de l'îlot de chaleur urbain. Dans le cas d'un ciel couvert, on peut plus facilement faire l'hypothèse d'un rayonnement également réparti sur toute la surface de ciel. La quantité d'énergie reçue par chaque facette dépendrait alors directement de son facteur de vue du ciel.

Chaque facette du mur ou de feuille va recevoir une quantité d'énergie de chaque facette de ciel, celle-ci pouvant être masquée par une ou plusieurs couches de feuilles.

4.3.3 Inter-réflexions

La partie sans doute la plus complexe est le calcul des inter-réflexions, qui justifie l'utilisation de méthodes numériques. Il s'agit, pour chaque facette, d'évaluer la quantité d'énergie échangée avec chacune des autres facettes de l'environnement qui dépend des facteurs de formes. On remarque sur le graphique 4.3 que la valeur des inter-réflexions semble être liée en partie à la géométrie (plus forte variabilité pour une répartition moins dense) mais surtout aux caractéristiques optiques des feuilles. Sur cette même figure, on voit que les inter-réflexions affectent peu la surface du mur. En effet, pour qu'un rayon incident « retourne » sur le mur, il faut qu'il soit réfléchi au moins deux fois (sur le dessus d'une feuille puis sur le dessous, ou sur le mur puis sur le dessous d'une feuille). En revanche, c'est évidemment le phénomène le plus important à prendre en compte pour estimer la réflexions.

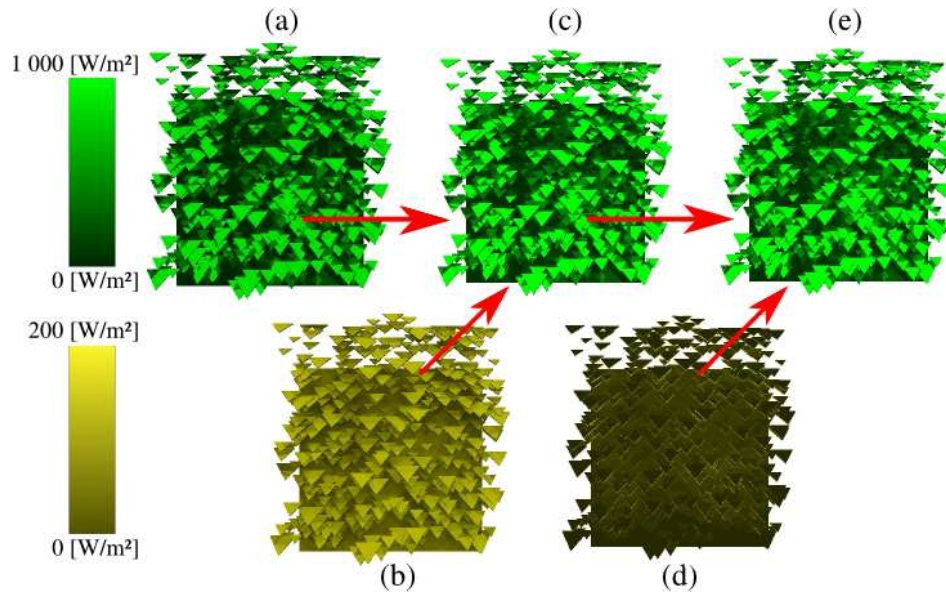


FIG. 4.5: Répartition du rayonnement incident en fonction des différentes étapes de la simulation, le 6 juin à 14H00

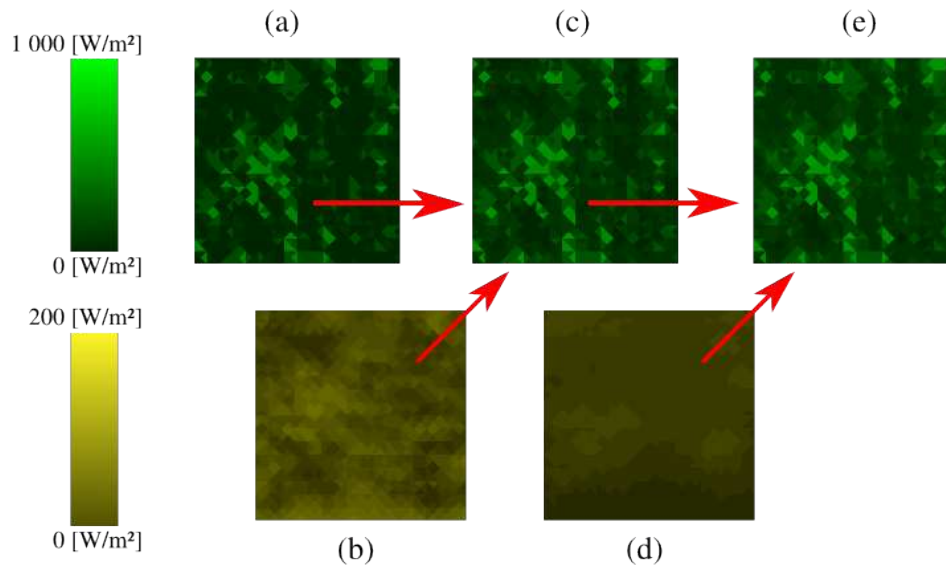


FIG. 4.6: répartition du rayonnement incident sur le mur, le 6 juin à 14H00

4.3.4 Limites de SOLENE

L'analyse des effets radiatifs nous amène à réfléchir sur plusieurs limites du modèle radiatif utilisé. Tout d'abord, si le fait d'utiliser une valeur moyenne des coefficients optiques des feuilles peut paraître correcte après une première transmission ou réflexion, ce n'est certainement plus le cas après, car le spectre de rayonnement énergétique a forcément changé.

Une des principales limites de SOLENE est de ne pas modéliser la réflexion spéculaire. Si les phénomènes qui l'expliquent sont très complexes et sont encore l'objet de débats scientifiques, il semble que le mode de réflexion des feuilles soit plutôt diffus lorsque l'incidente est proche de la normale. En revanche, la réflexion spéculaire peut jouer un rôle important lorsque l'on s'écarte de la normale [Guyot, 1999]. Le modèle de réflexion de SOLENE ne correspond donc pas toujours bien à ce qui se passe dans la réalité.

4.4 Conclusion

Les figures 4.5 et 4.6 montrent la répartition des différents éclairagements reçus par les feuilles (4.5) et le mur (4.6). Il permet de comprendre les étapes d'une simulation :

- (a) le rayonnement direct (noté E_{dir}) qui est beaucoup plus important sur les feuilles (jusqu'à $800 [W/m^2]$ ici, le 6 juin à 14H00 orientation ouest).
- (b) le rayonnement diffus (noté E_{dif}), plus faible mais loin d'être négligeable (presque $200 [W/m^2]$), qui sollicite les feuilles et le mur.
- (c) la somme avant inter-réflexions (noté E_{av})
- (d) éclairage du aux inter-réflexions (note E_{inter})
- (e) éclairage total après inter-réflexions (note E)

Bien que tout soit interdépendant, on peut schématiser et rapprocher chaque famille de paramètres à un effet qui lui est particulièrement lié (figure 4.7) :

1. Le rayonnement direct semble surtout affecté par la répartition des feuilles (LAI), même si l'inclinaison des rayons solaires (h) ainsi que la transmittivité des feuilles (τ_f) vont également jouer un rôle important.
2. Le rayonnement diffus dépend peu de la répartition mais plutôt du contexte : quantité de rayonnement diffus (tx_{dir} : dépend de l'heure de la journée et de l'orientation de la façade), répartition du rayonnement diffus envoyé par la voûte céleste.
3. Le rayonnement supplémentaire du au inter-réflexions semble directement lié aux caractéristiques des feuilles (τ_f, ρ_f).

Un des objectifs des simulations est de vérifier les hypothèses précédentes, c'est-à-dire montrer que chaque phénomène peut être caractérisé par un nombre réduit de paramètres.

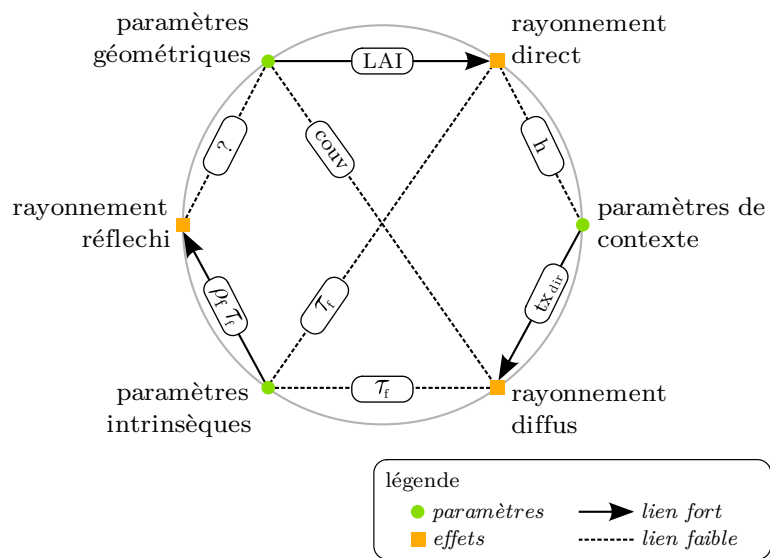


FIG. 4.7: Hypothèses sur l'influence des paramètres sur les effets

Chapitre 5

Simulations

Chaque étape intervenant dans la chaîne de traitement va permettre de fixer la valeur de certains paramètres. Plusieurs outils ont été utilisés, avec dans un premier temps une librairie `python` pour créer des géométries de façades végétales, avant de les importer dans `SOLENE` où les simulations à proprement parler sont effectuées. Ensuite, les données qui nous intéressent sont extraites des résultats bruts à l'aide de `python`, avant d'être finalement exploitées soit directement soit dans un outil d'analyse de données : `TANAGRA`.

5.1 Création de la géométrie

5.1.1 Modèle d'architecture végétale

La modélisation géométrique des plantes est étudiée, en particulier dans le domaine de l'imagerie numérique 3d, que ce soit pour les rendus de logiciel destiné à l'architecture, au paysagiste, mais également aux jeux vidéos, à l'animation, au cinéma, avant d'être utilisé pour dans des modèles scientifiques.

Les modèles mis en place par le laboratoire AMAP du CIRAD sont notamment utilisés pour étudier la répartition du rayonnement actif pour la photosynthèse¹ dans les couverts végétaux et son influence sur le développement de nouvelles feuilles, ce qui ressemble fortement à ce que l'on veut faire ici [Da Silva et al., 2008]. Les derniers développements logiciels de l'AMAP et de ses partenaires consistent en une plate-forme permettant d'intégrer et de faire collaborer un certain nombre de composants logiciels déjà existants [Pradal et al., 2008]. Parmi les composants de cette plate-forme, baptisée `OpenALEA`, on s'est intéressé à une librairie `python` qui permet de créer des géométries et de les visualiser : `PlantGL`.

5.1.2 Méthode utilisée

La librairie `python` utilisée consiste en plusieurs fonctions permettant de créer une géométrie de base (un triangle en ce qui nous concerne) de la manipuler pour la répéter et la répartir en lui appliquant des transformations simples (rotation et translation) suivant des valeurs issues de distributions probabilistes. Le choix a été

¹PAR pour Photosynthetically Available Radiation

fait de garder constant chacun des paramètres de rotation, afin de simplifier l'importation de la géométrie dans SOLENE (qui supporte mal que les faces se coupent).

Par la suite, les géométries sont exportées dans le format « .ply » pour le convertir en « .cir » utilisé par SOLENE. Un script python (« ply2cir.py ») est utilisé. Il doit notamment créer les normales et séparer la géométrie en deux parties :

- la scène dans laquelle les inter-réflexions seront prises en compte
- les masques qui ne sont utilisés que pour l'initialisation.

Ces géométries sont ensuite triangulées, les faces sont doublées avec inversion de la normale, tel que le modèle de transparence implanté dans SOLENE l'impose. On peut alors les utiliser en faisant varier les autres paramètres : ρ_f , τ_f , orientation, date, heure...

5.2 Étape d'initialisation

Comme les campagnes de mesure expérimentales, les campagnes de simulations numériques sont sujettes à différentes approximations que l'on peut classer de la façon suivante :

- erreurs physiques liées aux hypothèses de bases du modèle.
- erreurs du modèle géométrique : le modèle utilisé ne correspond pas à la réalité, c'est un des risques dans notre modèle en particulier vis-à-vis de la répartition des feuilles. Cela concerne également les effets de bords.
- erreurs numériques : dues à la discrétisation et aux méthodes de calculs approchées, qui sont présentes à plusieurs étapes dans SOLENE et en particulier au niveau du calcul des facteurs de formes et des inter-réflexions. La finesse du maillage est déterminante.

5.2.1 choix du maillage

Une fois la taille de l'échantillon choisi, il faut que le nombre de mailles utilisées dans le modèle soit suffisamment réduit pour que le temps de calcul soit raisonnable et permette de réaliser un nombre suffisant de simulations, tout en limitant les erreurs numériques.

La méthode a consisté à tester différentes combinaisons de maillages plus ou moins fin pour le mur ou pour les feuilles, puis à les comparer avec les résultats obtenus pour un maillage très fin. La figure 5.1 montre les résultats pour les flux transmis et réfléchis suivant que le maillage soit plus précis pour le mur ou pour les feuilles. On voit que la seule courbe qui diverge correspond au cas où le mur est représenté grossièrement. Puisqu'il s'agit de trouver le meilleur compromis entre la précision du résultat et le temps de calcul, on choisira un maillage plutôt fin pour le mur et assez grossier pour les feuilles.

5.2.2 Traitement des effets de bord

Des effets de bords interviennent à plusieurs étapes. Une solution aurait été de prendre un échantillon assez étendu pour toutes les étapes de la simulation avant

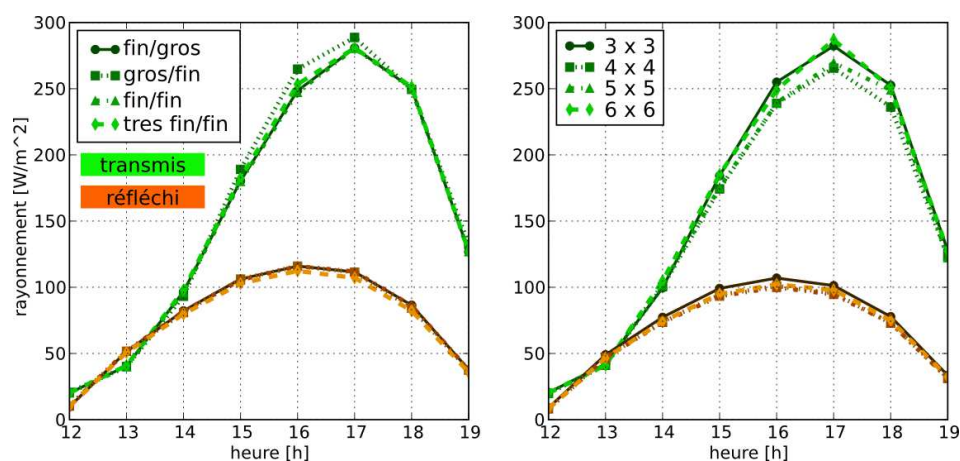


FIG. 5.1: Rayonnement réfléchi et transmis en fonction du choix du modèle : (a) finesse du maillage [feuilles/mur] — (b) taille du masque autour d'un échantillon $[2 \times 2]$ (échelle arbitraire)

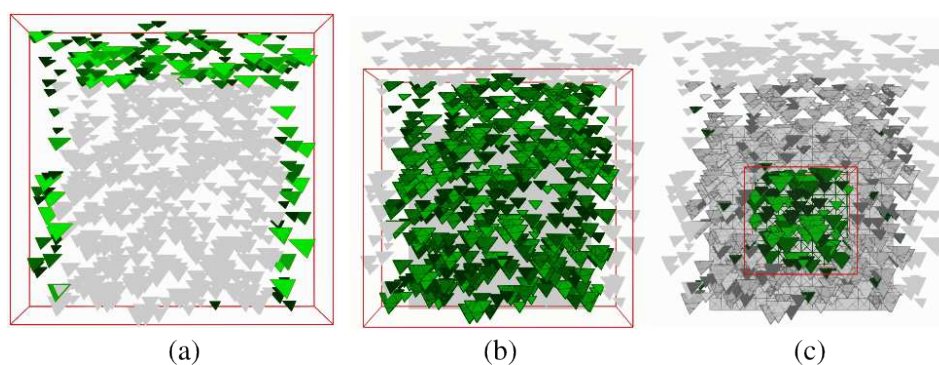


FIG. 5.2: Traitement des effets de bords : (a) masque – (b) scène – (c) échantillon analysé

de restreindre largement l'échantillon sur lequel les résultats sont traités. Afin de limiter le temps de calcul, on utilise un resserrement progressif après chaque étape, ce qui permet de limiter l'échantillon sur lequel le calcul des facteurs de formes, très gourmand en ressource de calcul, est effectué.

Dans un premier temps, on limite le domaine sur lequel le calcul du rayonnement incident avant réflexion est effectué. Cela se passe à l'étape de conversion de la géométrie depuis le format de `plantGL` à celui de `SOLENE`. On sépare la géométrie en deux fichiers, le premier étant uniquement utilisé comme masque (figure 5.2(a)), le second étant l'échantillon discrétisé sur lequel le rayonnement est calculé (figure 5.2(b)). Lors du calcul des facteurs de forme et des inter-réflexions, qui est alors limité à la partie centrale, le rayonnement réfléchi par la partie périphérique n'est

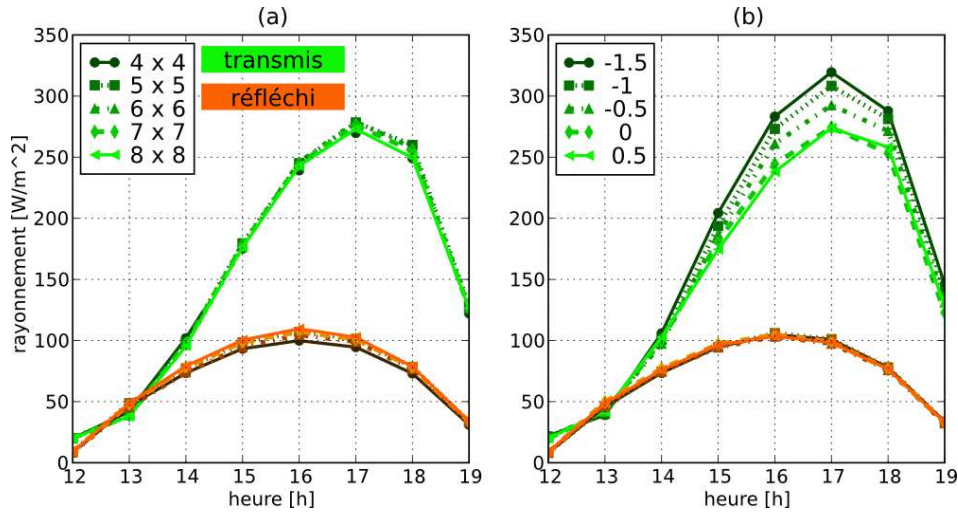


FIG. 5.3: Rayonnement réfléchi et transmis en fonction de l'échantillon : (a) taille de l'échantillon — (b) position de l'échantillon

pas pris en compte, ce qui crée un nouvel effet de bords. On limite donc encore la géométrie en extrayant le résultat uniquement sur une partie réduite (voir figure 5.2(c)).

5.2.3 échantillon représentatif

Comme la répartition géométrique des feuille est un des facteurs plus particulièrement étudié, le choix de l'échantillon représentatif paraît déterminant. Dans les faits, après plusieurs simulations de différents échantillons, on arrive à une géométrie représentative assez réduite.

La courbe 5.3 représente les flux transmis et réfléchis par la végétation en prenant en compte des échantillons de taille variable (a) et en déplaçant l'échantillon sur un axe diagonal (b). On voit que la taille de l'échantillon a peu d'effet sur les flux calculés. La translation de l'échantillon n'affecte pas le flux réfléchis. La variation du flux transmis est importante mais il est plus probable qu'il s'agisse d'une perturbation due à l'importance des effets de bords quand on décale l'échantillon vers le bas.

5.3 Déroulement de la simulation

5.3.1 Initialisation SOLENE

Dans cette étape, il s'agit d'évaluer le rayonnement incident qui servira d'entrée au calcul des inter-réflexions.

Le rayonnement incident provient de deux sources : le soleil (rayonnement direct) et le ciel (rayonnement diffus). On a vu que ces deux sources ont des effets différents en particulier sur leur répartition dans l'espace puisque le rayon du ciels sont parallèles alors que le rayonnement de la voûte céleste provient de chaque

partie du ciel et sa répartition varie en fonction des conditions météorologiques et de l'heure. Les commandes externes utilisées sont `masque_sol_lum.exe` pour le rayonnement direct et `masque_ciel_lum.exe` pour le rayonnement diffus.

Les paramètres fixés sont donc tous ceux qui sont liés au contexte (angles solaires, orientation, taux de rayonnement direct) qui sont déterminés par les heures et les dates pour lesquelles les simulations sont réalisées, ainsi que la transmittivité des feuilles.

5.3.2 facteurs de formes

L'étape suivante est le calcul des facteurs de forme. La géométrie considérée à ce stade est celle qui est triangulée, c'est-à-dire la partie centrale. `facform_lum.exe` prend en compte les transparences dans le calcul des facteurs de formes, c'est donc à cette étape qu'il faut avoir créé le descripteur `transmittivité_scene.val`. Cette étape est indépendante du contexte extérieur et de la réflectivité des feuilles. Assez long à réaliser, le calcul des facteurs de formes est donc réalisé uniquement pour chaque combinaison (géométrie + transmittivité).

Cette étape permet également de calculer des facteurs plus synthétiques qui représentent un facteur de vue du ciel (`ff_hors_scene.val`) que l'on peut utiliser pour calculer le taux de rayonnement réfléchi vers l'extérieur et donc ρ . Malheureusement, ces valeurs ne semblent pas prendre en compte la transparence. Il faudra donc utiliser une autre méthode.

5.3.3 Calcul des inter-réflexions

La dernière étape traitée par SOLENE est le calcul des inter-réflexions par la commande externe `radiosite_lum.exe`. Les paramètres d'entrées sont le rayonnement incident total sur chaque facette, la matrice de facteurs de forme et la matrice de « facteurs de transparence ». Elle renvoie les valeurs de rayonnement incident, réfléchi et absorbé après inter-réflexions. Malheureusement, le rayonnement absorbé est calculé de la même manière que pour le cas sans transparence : pour calculer le rayonnement absorbé, on utilisera donc un traitement ultérieur manuel, prenant en compte le taux de transmission.

5.4 Traitement des résultats

5.4.1 étapes préliminaires

Dans un premier temps, il s'agit de récupérer les informations calculées sur le domaine d'étude. Plusieurs fonctions en python permettent de :

- déterminer le centre de gravité de chaque face (feuilles), puis de chaque facette (mur)
- identifier les feuilles et les facettes du mur dont le centre de gravité est compris dans l'intervalle d'étude
- extraire les données des faces et des facettes et faire la moyenne surfacique des grandeurs qui nous intéressent.

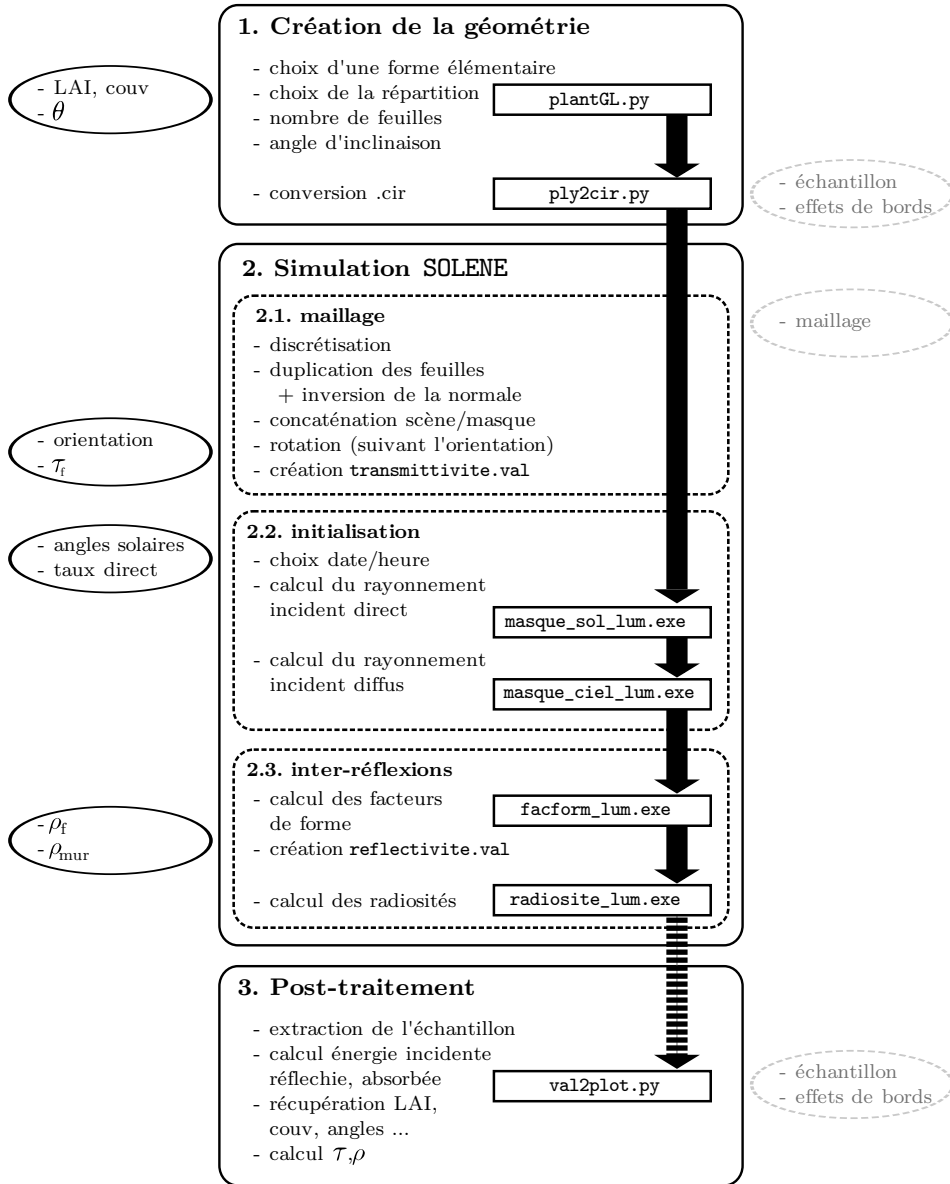


FIG. 5.4: Schéma bilan du déroulement d'une simulation

Ensuite, on récupère pour chaque cas des informations extraites de la géométrie et du contexte. En amont, le LAI et le taux de couverture sur l'intervalle d'étude de chaque géométrie ont été calculés, ainsi que les données solaires pour chaque heure et chaque orientation de façade : rayonnement direct et diffus sans masques, angles solaires absolus (hauteur, azimut) et angles solaires relatifs à la façade (angle d'incidence, azimut relatif).

5.4.2 calcul de τ

Le taux de transmission de la couverture végétale est défini comme le rapport entre l'énergie incidente sur le mur masqué par la végétation et l'énergie incidente sur le mur sans masques. Dans la pratique, l'énergie incidente est obtenue par la moyenne surfacique du rayonnement après inter-réflexion sur les facettes du mur qui sont comprises dans l'intervalle d'étude.

Dans un deuxième temps, on récupère les données météorologiques sur le rayonnement solaire direct et diffus (I_0) correspondant au jour et à l'heure considérés, ainsi qu'à l'orientation de la façade. On peut alors calculer la transmittivité :

$$\tau = \frac{1}{S \cdot I_0} \sum_{i \in \text{mur}} S_i \cdot E_i \quad (5.1)$$

5.4.3 calcul de ρ

Le calcul de la réflectivité de la partie de mur étudié est plus délicat. En effet, il est nécessaire d'isoler uniquement le flux réfléchi vers l'extérieur, c'est-à-dire qui ne prend pas en compte le flux dirigé vers les feuilles situées aux alentours de l'échantillon, ni entre les éléments de l'échantillon. Il existe deux techniques pour retrouver la valeur. La première consiste à multiplier le rayonnement réfléchi pour chaque facette par le facteur de vue hors scène. Or, il semble que le calcul de ce facteur, qui se déroule en même temps que les facteurs de forme, ne prenne pas en compte la transparence. D'après les essais effectués, la différence avec la deuxième méthode est relativement importante.

La deuxième méthode est la plus fiable dans notre cas et consiste à considérer que le rayonnement réfléchi vers l'extérieur est celui qui n'est pas absorbé par les éléments de la scène après inter-réflexions. On va donc retirer au rayonnement incident avant inter-réflexions (E_{av}) la partie du rayonnement après inter-réflexion (E) qui n'est ni réfléchie ni transmise :

$$\rho = \frac{1}{S \cdot I_0} \cdot \left(\sum_{\forall i} E_{av,i} \cdot S_i - (1 - \rho_m) \sum_{i \in \text{mur}} E_i \cdot S_i - (1 - \tau_f - \rho_f) \sum_{i \in \text{feuilles}} E_i \cdot S_i \right) \quad (5.2)$$

Chapitre 6

Exploitation des résultats

La procédure mise au point et réalisée dans la partie précédente a permis d'obtenir les variations des caractéristiques radiatives de la couverture en fonction de plusieurs paramètres. L'objet de cette partie est d'utiliser ces résultats afin d'en extraire un moyen de prévoir simplement le comportement d'une façade végétale face à une sollicitation solaire. Globalement, deux approches complémentaires sont utilisées en parallèle. D'une part, les résultats sont traités de manière statistique pour mettre en évidence les paramètres clés qui font apparaître les corrélations les plus fortes. D'autres part, on les utilise pour mettre au point un modèle physique simplifié basé sur ces paramètres. Réciproquement, l'approche physique donne aussi des pistes pour introduire des paramètres plus englobants ou plus précis dans l'analyse statistique pour tester leur pertinence.

Les deux phénomènes que l'on cherche à caractériser (la transmission et la réflexion) seront traités en parallèle, bien que les méthodes statistiques et les modèles physiques utilisés soient sensiblement différents.

6.1 Approche statistique

6.1.1 Méthodes utilisées

Les méthodes statistiques pour analyser le comportement un système physique dépendant de plusieurs variables sont nombreuses et plus ou moins complexes à appliquer. Nous avons utilisé les régressions linéaire multiple, qui est une généralisation à plusieurs variables explicatives d'une régression linéaire simple. Sans rentrer dans les détails, il s'agit d'utiliser la méthode des moindres carrés dans espace de dimension égale au nombre de variables explicatives. Malheureusement, dans notre cas, beaucoup des hypothèses qu'il faudrait vérifier pour appliquer la méthode proprement ne sont pas valables, en particulier en ce qui concerne les distribution des valeurs variables et, évidemment, la linéarité supposé des phénomènes traités. Il convient donc de prendre les résultats des régressions avec du recul. Dans notre cas, elle nous servira plus d'outil dans la compréhension des phénomènes que de résultats exploitables numériquement.

Un second outil statistique, incorporé dans TANAGRA, sélectionne les variables les plus efficaces dans les régressions linéaires. Ainsi, lorsque plusieurs paramètres

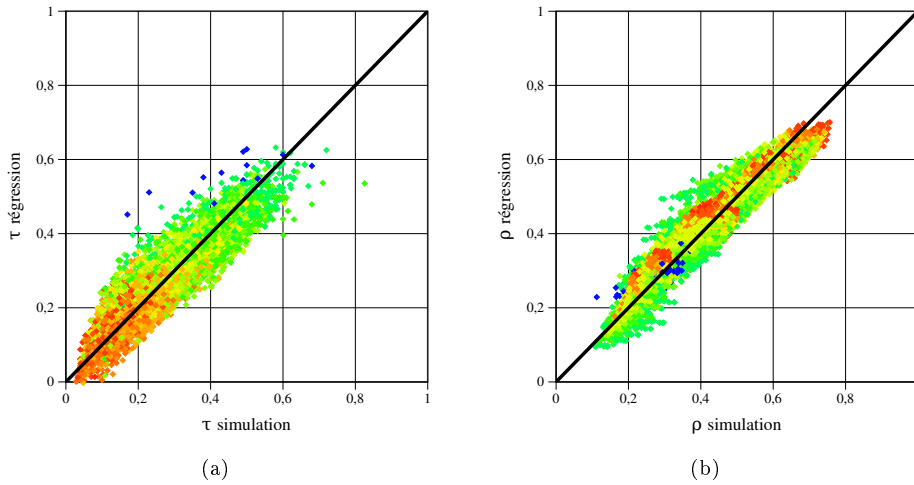


FIG. 6.1: Corrélation des résultats des régressions linéaires multiples

et indicateurs se réfèrent au même phénomène et sont lié entre eux, le modèle statistique va choisir la variable la plus pertinente et éliminer les autres.

6.1.2 Estimation de la transmittivité équivalente

Les variables explicatrices utilisées sont les suivantes :

- géométriques : $\cos(\theta)$, LAI , LAI_{proj} , $couv$
- contexte : $\cos(h)$, $\cos(a_{z,rel})$, tx_{dir} , I_0
- intrinsèque : τ_f , ρ_f

Les régressions linéaires multiples laissent apparaître une corrélation importante entre la transmittivité équivalente et 6 de ces facteurs, par ordre d'importance :

- $couv$ ($r^2 = 0,43$)¹
- τ_f ($r^2 = 0,55$)
- $\cos(h)$ ($r^2 = 0,66$)
- $\cos(\theta)$ ($r^2 = 0,73$)
- tx_{dir} ($r^2 = 0,80$)
- ρ_f ($r^2 = 0,83$)

Ainsi, le rayonnement direct incident n'intervient pas directement dans le taux de transmission équivalent de la couverture végétale. Seuls la hauteur solaire et le taux de rayonnement direct sont pris en compte dans la régression, avec l'avantage qu'ils sont faciles à calculer, notamment la hauteur solaire puisqu'elle est indépendante de l'orientation de la façade.

¹le r^2 présenté est celui que l'on aurait obtenu en utilisant uniquement le paramètre considéré et ceux jugés plus important

6.1.3 Estimation de la réflectivité équivalente

S'il n'a pas été pris en compte dans le traitement des résultats concernant la transmission, un des paramètres importants pour le phénomène de réflexion est la réflectivité du mur. On traite notamment le cas particulier pour lequel celle-ci est nulle, c'est-à-dire un mur soit totalement transparent, soit totalement absorbant, ou encore simplement une paroi végétale sans mur. Cela peut correspondre au deuxième type de façade végétale abordé dans la partie « typologie » : la végétation comme brise-soleil. Pour être un peu plus proche de la réalité, il faudrait obtenir des caractéristiques radiatives différentes suivant le côté de la façade, car il est probable que le comportement ne serait pas symétrique.

Les paramètres pris en compte dans la régression linéaire sont donc les mêmes que pour la transmittivité en ajoutant la réflectivité du mur.

La corrélation obtenue paraît satisfaisante (voir figure 6.1(b)). Les paramètres clés pour la réflectivité des couvertures végétales sont les suivants :

- τ_f ($r^2 = 0,49$)
- ρ_f ($r^2 = 0,78$)
- $couv$ ($r^2 = 0,85$)
- ρ_m ($r^2 = 0,89$)
- $cos(h)$ ($r^2 = 0,91$)

On remarque que les coefficients optiques des feuilles permettent presque à eux seuls de prévoir la réflectivité globale d'une couverture végétale, ce qui correspond à ce qui était attendu. Le taux de couverture est le seul facteur géométrique jugé pertinent, tandis que les paramètres de contexte n'ont qu'un effet marginal sur la précision obtenue.

6.2 Approche paramétrique

Cette partie constitue la première étape vers un modèle physique du comportement radiatif de la façade. Il s'agit d'utiliser les résultats de la simulation pour isoler l'action de chacun des effets : rayonnement direct, rayonnement diffus et inter-réflexions.

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur quelques hypothèses de base que l'on va chercher à vérifier. En effet, d'après le déroulement de la simulation, si l'on arrive à séparer chacun des effets, on peut se rapprocher pour chacun d'un plus petit nombre de variables :

- Pour le calcul de l'énergie direct et diffuse transmise au mur avant inter-réflexions, les réflectivités du mur et des feuilles ne sont pas prises en compte.
- On fait l'hypothèse que l'énergie directe reçue avant inter-réflexions est proportionnelle à l'énergie directe sans masque $I_{0,dir}$, le rapport de proportion étant lié à la géométrie, aux angles solaires et à la transmittivité des feuilles. Idem pour le taux d'énergie diffuse

$$\begin{cases} E_{dir} = I_{0,dir} \cdot f_{dir}(geom, angles, \tau_f) \\ E_{dif} = I_{0,dif} \cdot f_{dif}(geom, angles, \tau_f) \end{cases} \quad (6.1)$$

- Pour le calcul des inter-réflexions, les réflectivités sont prises en compte tandis que toutes les autres variables n'interviennent qu'à travers l'énergie incidente avant inter-réflexion. L'hypothèse que l'on fait est que les inter-réflexions dépendent de manière linéaire de l'énergie incidente avant inter-réflexions ($E_{dir} + E_{dif}$) et qu'il est indépendant des angles solaires.

$$E_{inter} = (E_{dir} + E_{dif}) \cdot f_{inter}(geom, \rho_f, \rho_m) \quad (6.2)$$

On peut adimensionner et retrouver les coefficients de transmission

$$\begin{aligned} E &= (E_{dir} + E_{dif}) \cdot (1 + f_{inter}) \\ &= (I_{0,dir} \cdot f_{dir} + I_{0,dif} \cdot f_{dif}) \cdot (1 + f_{inter}) \end{aligned}$$

$$\tau = \frac{E}{I_0} = \left(\frac{I_{0,dir}}{I_0} \cdot f_{dir} + \frac{I_{0,dif}}{I_0} \cdot f_{dif} \right) \cdot (1 + f_{inter})$$

On retrouve donc des coefficients adimensionnés, qui peuvent être vus comme des coefficient de transmittivité partiel. On les note τ_{dir} , τ_{dif} et τ_{inter} . On peut exprimer τ uniquement à l'aide de ces coefficients et du taux de rayonnement direct tx_{dir}

$$\tau = (tx_{dir} \cdot \tau_{dir} + (1 - tx_{dir}) \cdot \tau_{dif}) \cdot (1 + \tau_{inter}) \quad (6.3)$$

Cette formulation permet de retrouver chacun des termes en fonction des résultats des étapes de la simulation, ainsi :

$$\begin{cases} \tau_{dir} = \frac{E_{dir}}{I_{0,dir}} \\ \tau_{dif} = \frac{E_{dif}}{I_{0,dif}} \\ \tau_{inter} = \frac{\tau}{tx_{dir} \cdot \tau_{dir} + (1 - tx_{dir}) \cdot \tau_{dif}} - 1 \end{cases} \quad (6.4)$$

On peut alors rechercher les paramètres déterminant de chacun des phénomènes.

Prise en compte de l'inclinaison des feuilles

Pour mieux prendre en compte la forme du feuillage, on peut corriger le LAI en fonction de l'inclinaison des feuilles. Projeter le LAI sur un plan vertical ne permet pas d'améliorer le résultat des modèles. Par contre, en utilisant le LAI , l'angle l'inclinaison des feuilles et la hauteur solaire, on peut projeter l'ombre de chaque feuille sur le mur et obtenir un coefficient de "densité surfacique d'ombre" fonction de l'heure solaire. Ce paramètre est toujours trop englobant pour arriver à un résultat vraiment précis mais on va pouvoir s'approcher d'un modèle physique, en utilisant quelques paramètres empiriques.

Si on projette les triangles sur un plan vertical, leur base étant parallèle à ce plan et horizontale, ils subissent la même homotétie que leur hauteur. Le rapport de proportion est alors donné par :

$$K = \cos(\theta) + \sin(\theta) \cdot \tan(h)$$

taux de rayonnement direct transmis – τ_{dir}

D'après l'étude paramétrique, le taux de rayonnement direct transmis au mur dépend essentiellement de la transmittivité des feuilles, de la géométrie et de la hauteur. On va chercher à se rapprocher du modèle exponentiel utilisé pour les plantes horizontales, en utilisant le *LAI* en projection suivant la hauteur solaire :

$$\tau_{dir} = a_1 \cdot e^{-a_2 \cdot K \cdot LAI}$$

Lorsque que l'on observe les résultats obtenus avec cette expression, on se rend compte que la transmittivité n'est pas prise en compte. Une meilleure expression, trouvée par tâtonnement, fait intervenir sa racine carré :

$$\tau_{dir} = a_1 \cdot \sqrt{\tau_f} \cdot e^{-a_2 \cdot K \cdot LAI}$$

avec

$$\begin{aligned} a_1 &= 1,5 \\ a_2 &= 0,7 \end{aligned}$$

taux de rayonnement diffus transmis – τ_{dif}

Le phénomène de diffusion est un peu plus flou. Les paramètres utilisés sont plus globaux, le principal étant le taux de couverture.

$$\tau_{dif} = a_3 \cdot (1 - cov + cov \cdot \tau_f)$$

taux d'inter-réflexion – τ_{inter}

Le taux d'inter-réflexion est beaucoup plus difficile à prévoir. Il semble qu'il ne soit pas vraiment possible d'ignorer les liens entre son amplitude et les taux de rayonnement diffus. Une idée que nous n'avons pas concrétisée serait d'utiliser deux taux d'inter-réflexion : le premier ne concernant que le rayonnement direct et l'autre le rayonnement diffus. Il faudrait alors diviser le calcul des inter-réflexion en deux opérations avec la fonction `radiosite_lum.exe`, et les sommer ensuite.

En attendant, on va dans un premier cas négliger τ_{inter} , en sachant que le rayonnement dû aux inter-réflexions n'est pas si important. On obtient le résultat 6.2(c), avec une corrélation $r^2 = 0,60$. Dans un deuxième temps, on utilise le taux d'inter-réflexions issue des simulations (courbe 6.2(d)), qui donne évidemment un meilleur résultat ($r^2 = 0,71$).

6.3 Approche physique

Plusieurs modèles physiques ont été testés par des simulations. Il s'agit de traiter plus ou moins précisément la répartition des feuilles. Plus on utilise des données géométriques précises, plus on s'éloigne d'un modèle que l'on peut utiliser en pratique. En effet, des données complexes peuvent être extraites facilement et précisément du modèle géométrique, ce qui est plus compliqué dans la réalité lorsque l'on se retrouve face à une façade existante dont on veut évaluer le comportement, ou dans le cas où elle n'existe pas et où l'on veut prévoir l'effet

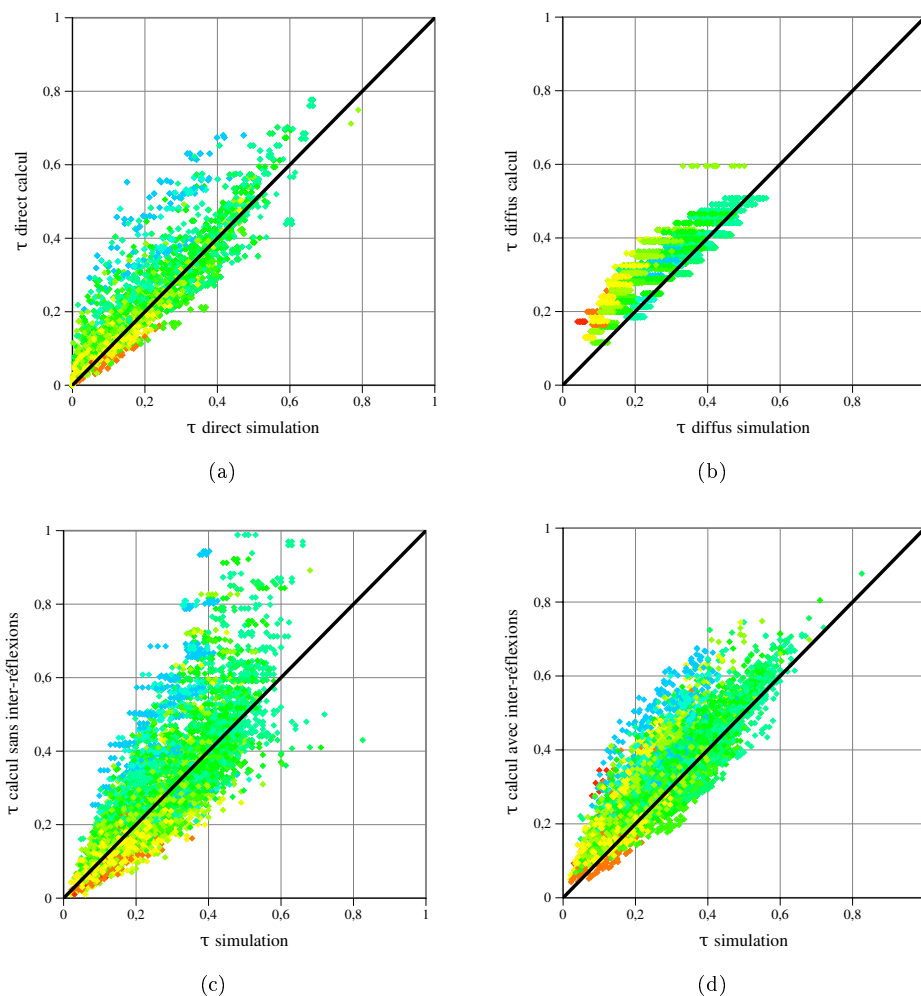


FIG. 6.2: Corrélation transmittivité – différentes étapes du modèle paramétrique

qu'elle aura sur les échanges thermiques en fonction de son développement ou de paramètres externes comme la disponibilité en eau, la saison.

Nous allons donc partir du modèle le plus simple possible, ne prenant en compte qu'une indication globale de la répartition des feuilles. Dans un deuxième temps, une représentation plus précise où plusieurs zones caractérisées par une densité plus ou moins forte de feuillage sera incorporée au modèle.

6.3.1 Modèle en couches continues

En utilisant le taux de couverture, on peut obtenir la transmittivité moyenne correspondante à la partie recouverte par le feuillage. Or, on remarque qu'elle est presque nulle pour la plupart des cas traités, ce qui nous amène à imaginer un modèle à deux zones : une zone couverte et une zone non couverte, où les car-

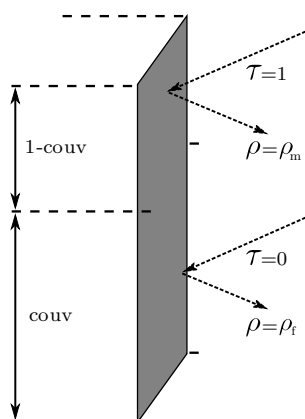


FIG. 6.3: Modèle couche en deux zones

actéristiques globales correspondent à la moyenne des caractéristiques de chaque zones (voir figure 6.3).

Il s'agit donc d'essayer de prendre en compte quelques indicateurs de la répartition (*couv* et *LAI*) puis d'apporter une correction avec la hauteur. Dans ce modèle, on ne prend pas en compte les relations entre la transmittivité équivalente et la réflectivité des feuilles, ni entre la réflectivité équivalente et la transmittivité des feuilles, ce qui induit des erreurs fortes dans le modèle pour l'estimation de la réflectivité équivalente, pour laquelle les paramètres intrinsèques de la feuilles sont décisifs.

transmittivité

D'après l'observation qui nous a conduit à utiliser le modèle à deux zones, on considère que la transmittivité de la partie couverte est nulle et celle de la partie non couverte est égale à un. la transmittivité globale est simplement égale au complémentaire du taux de couverture :

$$\tau_{eq} = 1 - cov$$

On peut corriger un peu ce modèle en prenant en compte les paramètres de contexte et notamment la hauteur solaire, qui est intéressante car elle n'est pas liée à l'orientation de la façade :

$$\tau_{eq} = \cos(h).(1 - cov)$$

L'échelle de couleur de la figure 6.4 correspond à l'angle d'inclinaison des feuilles. On voit que ce facteur n'est pas bien pris en compte car les groupes de points par couleurs sont assez disjoints. On peut également remarquer que les points hors cadre correspondent à un angle particulier : il s'agit de feuilles perpendiculaires au mur, pour lesquelles le taux de couverture, qui est utilisé en projection sur le mur, n'a pas de sens.

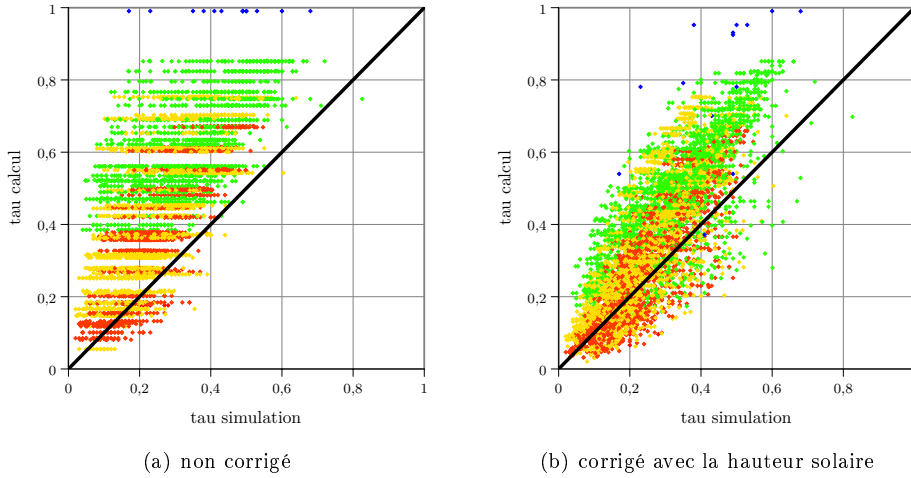


FIG. 6.4: Corrélation entre la transmittivité de la simulation et la transmittivité calculée pour le modèle en couches continues

On obtient un $r^2 = 0,54$

Une limite importante de ce modèle est que les propriétés radiatives des feuilles n'ont pas été prises en compte, ce qui rend impossible l'évaluation de l'impact des autres facteurs extérieurs (CO_2 , température, humidité) liés à l'évapo-transpiration. Pour faire intervenir la transmittivité des feuilles, on va utiliser une valeur différente de 0 pour la partie couverte. On fait intervenir le LAI :

$$\tau_{eq} = \cos(h) \cdot (1 - \text{couv} + \text{couv} \cdot \tau^{LAI})$$

La transformation avec τ^{LAI} n'est pas rigoureuse.

On obtient un $r^2 = 0,66$ soit une légère amélioration de la corrélation.

réflectivité

Dans ce modèle, la réflectivité équivalente du mur revient à prendre la moyenne pondérée par leur surface respective des réflectivités de la partie couverte et de la partie où le mur est apparent.

$$\rho_{eq} = \text{couv} \cdot \rho_f + (1 - \text{couv}) \cdot \rho_m$$

Sur la courbe 6.5(a), l'échelle colorée utilisée représente la valeur du taux de transmission des feuilles. On remarque que sa prise en compte est importante dans ce modèle car c'est ce qui induit un erreur importante.

Dans un premier temps, on va prendre en compte la transmittivité de manière simplifiée, en considérant par exemple que la moitié de l'énergie qui est réfléchie vers l'extérieur l'est en étant une fois transmise à travers une feuille :

$$\rho_{eq} = \text{couv} \cdot \rho_f + \text{couv} \cdot \tau_f + (1 - \text{couv}) \cdot \rho_m \quad (6.5)$$

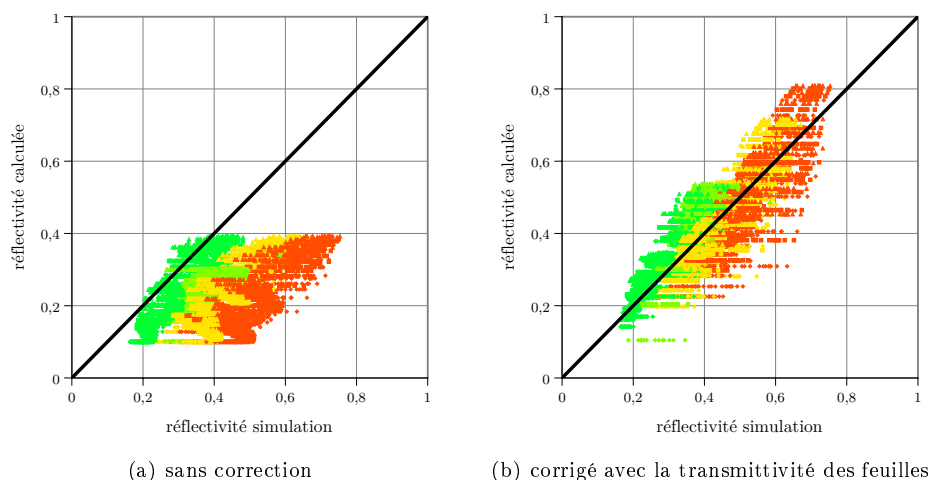


FIG. 6.5: Corrélation réflectivité – modèle couche

Le modèle est ainsi sensiblement amélioré puisque le r^2 passe de 0,26 à 0,75 (figure 6.5(b)).

6.3.2 Modèle en couches continues réparties

L'étape suivante consiste à mieux prendre en compte la répartition des feuilles, et à diviser en un plus grand nombre de zones correspondant au nombre de couches de feuilles, avec une transmittivité et une réflectivité équivalente pour chaque zone. Cette approche permet de mieux prendre en compte les inter-réflexions en faisant notamment intervenir la réflectivité des feuilles et du mur dans le calcul de la transmittivité. Sa limite est que les données nécessaires au calcul de ce modèle sont a priori difficiles à obtenir dans un cas réel, et qu'il faudrait se rapprocher d'un modèle empirique pour obtenir ces données.

Transmittivité

On peut procéder en deux étapes :

1. On ne considère que les transmissions

$$\tau_{eq} = 1 - cov + cov_1 \cdot \tau^1 + cov_2 \cdot \tau^2$$

2. On prend en compte les inter-réflexions

$$\tau_{eq} = 1 - cov + cov_1 \cdot \tau_{eq1} + cov_2 \cdot \tau_{eq2}$$

Après avoir testé les deux modèles, ils donnent des résultats quasiment identiques, qui n'améliorent pas le le modèle précédent pourtant beaucoup plus simple.

Réflectivité

$$\rho_{eq} = (1 - cov) \cdot \rho_m + cov_1 \cdot \rho_{eq1} + cov_2 \cdot \rho_{eq2}$$

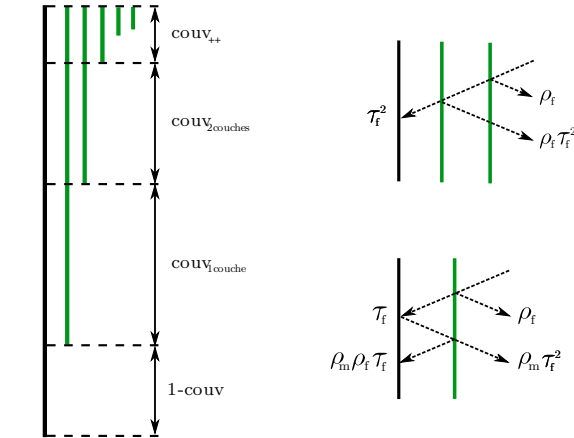


FIG. 6.6: Modèle en couches à 4 zones, calcul des transmittivités et réflectivités équivalentes

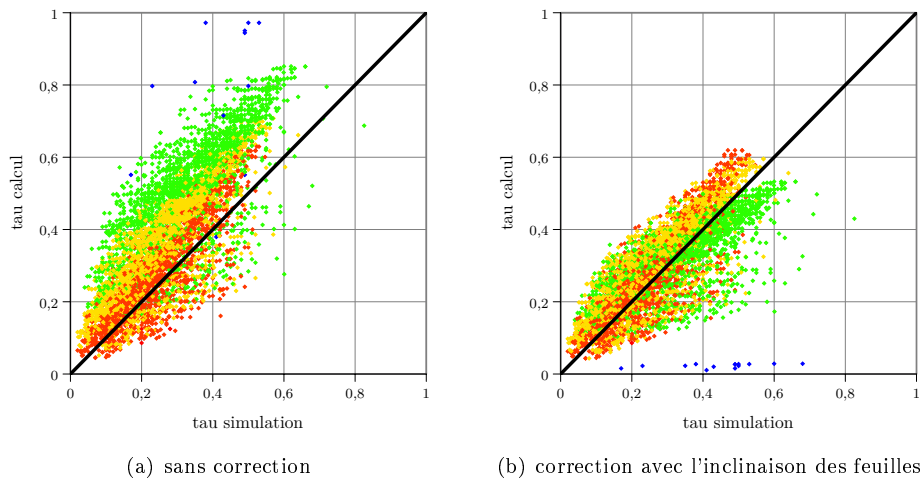


FIG. 6.7: Corrélation pour le modèle en couches continues réparties

Ce modèle, qui représente de manière plus complexe la répartition des feuilles sur la surface du mur, donne des résultats largement divergents pour le calcul de la réflectivité, même en essayant de se rapprocher des résultats des simulations par des méthodes empiriques. Le modèle précédent donnant des résultats relativement précis et à exprimer en fonction des propriétés radiatives des feuilles, nous allons en rester là pour la détermination de la réflectivité.

6.3.3 Modèle en bandes inclinées

Un modèle qui permet de prendre en compte l'inclinaison des feuilles, qui paraît déterminante, et même la forme des feuilles aurait consisté en considérant des bandes horizontales d'une certaine inclinaison. Il permettrait en particulier de modéliser l'existence de rayons incidents qui arrivent sur le mur ou qui sont réfléchis vers l'extérieur en étant uniquement transmis puis réfléchis, et non pas forcément réfléchis deux fois ou transmis deux fois comme les modèles en couches verticales l'imposent. On se rapprocherait de la relation (6.5) où l'on choisit arbitrairement que le rayonnement transmis à travers la partie couverte est également réfléchi en partie vers l'extérieur.

Conclusion de la deuxième partie : Vers un modèle simplifié de détermination des caractéristiques radiatives d'une couverture végétale de façade

6.3.4 Transmittivité

Le tableau 6.1 dresse le bilan des différentes approches utilisées du point de vue de la corrélation entre les résultats des modèles et les simulations. On remarque qu'il est difficile d'obtenir des résultats satisfaisants sans faire intervenir des paramètres empiriques, comme c'est le cas pour les modèles paramétriques corrigés et a fortiori pour le modèle statistique. Ce dernier nous donne pourtant des résultats intéressants, bien qu'il prenne en compte un nombre plus important de facteurs et que l'on perde le sens physique au passage. Il est également sujet à certaines précautions étant donné les biais pouvant être créés par des méthodes statistiques pas complètement rigoureuses.

Le modèle que l'on peut retenir dépend fortement de l'utilisation que l'on veut en faire. Ainsi, si le but est de caractériser l'effet d'une variation des paramètres radiatifs des feuilles, c'est bien qu'il faut les prendre en compte, or nous n'avons pas bien réussi à les inclure dans le modèle sans utiliser de résultats empiriques. Il convient donc de vérifier au préalable si le modèle géométrique n'est pas trop éloigné de la réalité.

À l'inverse, si le but est de caractériser l'effet de la façade en fonction des paramètres géométriques et contextuels, la formulation physique du modèle avec deux zones peut suffire. On aura en particulier une loi intéressante en fonction de la hauteur solaire, qui permet de caractériser simplement le taux de transmission de la couverture quels que soient son orientation et son contexte géographique.

Enfin, on peut prendre en compte l'environnement proche par l'intermédiaire du taux de rayonnement diffus. Ainsi, si on considère le rayonnement incident après inter-réflexions dues aux surfaces environnantes, on pourra l'ajouter au rayonne-

Méthode	r^2 pour τ	r^2 pour ρ
Régression	0,83	0,91
Modèle paramétrique brut	0,60	–
Modèle paramétrique corrigé	0,71	–
Modèle physique brut	0,54	0,26
Modèle physique corrigé	0,66	0,75

TAB. 6.1: Bilan des résultats des corrélations

ment incident dans la part du rayonnement diffus. Ce raisonnement est rendu complexe par le fait qu'il faudra alors mettre en place une méthode itérative, à moins d'utiliser une augmentation de la part du rayonnement diffus "forfaitaire" simplifié, en fonction de la configuration de l'environnement proche.

Du point de vue de la transmittivité, si notre étude a permis de mettre en avant les paramètres clé et de bien comprendre les phénomènes mis en jeu, on est assez loin d'un modèle efficace et universel. On peut toutefois remarquer que pour dès que la densité de feuillage devient un peu importante (supérieure à 2, ce qui est assez courant pour une couverture végétale bien développée) la transmittivité tombe vite à 0, ce qui explique que pour une densité faible, le taux de couverture et la hauteur suffise pour obtenir des résultats satisfaisant. Ainsi, nous proposons une première catégorisation dans laquelle une façade avec un LAI supérieur à 3, c'est-à-dire typiquement une façade pour laquelle on n'aperçoit aucune partie du mur, quel que soit le point de vue, le taux de transmittivité sera très faible et ne dépendra que des caractéristiques radiatives des feuilles. Pour des densités foliaires plus faibles et en particuliers lors de la période de croissance, les modèles physiques et paramétriques peuvent fonctionner.

6.3.5 réflectivité

Les résultats sont plus satisfaisants pour le taux de rayonnement réfléchi, qui dépend très peu de paramètres difficiles à quantifier (LAI , angles), mais qui s'expliquent assez bien avec les propriétés radiatives des feuilles et du mur. Ainsi la formule simplifiée ne faisant intervenir que le taux de couverture et les propriétés radiatives paraît satisfaisante dans la plupart des cas, bien que l'on puisse se rapprocher du modèle statistique pour un peu plus de précision. En particulier, les résultats semblent peu sensibles aux critères de contexte, comme les angles solaires ou le taux de rayonnement diffus.

On notera que la transmittivité des feuilles compte pour beaucoup dans le taux de réflexion d'une façade végétale.

Conclusion et discussion

Démarche

Notre travail s'inscrit dans une démarche multi-physique et multi-échelle dont l'objectif final est d'intégrer une représentation complète de façade végétale dans un modèle microclimatique à l'échelle urbaine. La première partie de ce rapport présentait une analyse typologique et historique de la végétation urbaine et des enveloppes végétales architecturales, ainsi qu'un état de l'art sur la modélisation des interactions entre la végétation et son milieu urbain, en nous attachant plus particulièrement sur les façades végétales. Cela nous a permis de détecter des limites dans les modèles existants en particulier du point de vue du rayonnement courte longueur d'onde. Dans la deuxième partie, nous nous sommes donc concentrés sur la modélisation radiative des couvertures végétales de façades : à l'aide des résultats d'une campagne de simulation paramétrique, nous avons cherché à développer un modèle pour évaluer les caractéristiques radiatives CLO d'une façade recouverte de lierre.

Rappelons les différentes hypothèses que nous avons effectuées pour mener à bien nos simulations :

- À propos du modèle radiatif : Nous avons utilisé des propriétés optiques moyennes sur le spectre de rayonnement solaire, pondérées par la répartition énergétique sur chaque bande spectrale. D'autre part, le mode de réflexion diffus pour lequel SOLENE est limité, ne correspond pas tout à fait à celui des plantes, du moins lorsque l'angle d'incidence s'écarte de la normale.
- À propos du modèle géométrique : Nous avons considéré une répartition complètement aléatoire des feuilles, ce qui ne correspond pas à leur mode de croissance qui consiste justement à pousser pour capter le plus de rayonnement possible. Des simplifications ont également été faites au niveau de la forme des feuilles et de leur orientation.
- Le contexte climatique est celui de la France, avec un ciel clair, bien que les paramètres utilisés dans l'analyse des résultats permettent de découpler les paramètres météorologique (taux de rayonnement diffus) et géométriques (angles solaires).
- Les interactions entre les différentes familles de paramètres ne sont pas considérées.

Résultats

L'hypothèse que nous cherchions à vérifier est que les propriétés radiatives d'une couverture végétale dépendent essentiellement des caractéristiques géométriques et de l'architecture foliaire, ainsi que des paramètres optiques intrinsèques des feuilles. Les analyses statistiques nous ont montrés qu'on pouvait effectivement faire abstraction d'une partie du contexte climatique, au moins en ce qui concerne la réflectivité. Pour le taux transmission solaire, il reste à prendre en compte la hauteur solaire et le taux de rayonnement diffus, qui pourrait par ailleurs permettre d'y intégrer l'effet des réflexions provenant de son environnement bâti. Le principal intérêt de ces résultats est de pouvoir étudier l'effet climatiques des façades végétales en intégrant les effets :

- d'une variation des propriétés optiques des feuilles en fonction de facteurs externes, comme la disponibilité en eau,
- de l'architecture végétale et du stade de développement des plantes,
- de l'angle d'incidence solaire sur la façade, par l'intermédiaire de la hauteur solaire.

Limites

Ces résultats se heurtent cependant à des limites, dont certaines pourraient mériter que la méthode soit reconsidérée.

Si on se ramène à nos hypothèses de simulation, on peut penser qu'une représentation plus réaliste de la géométrie des feuilles, ainsi qu'une distribution variable des angles d'orientation aurait pu être utilisées, au moins pour vérifier la sensibilité du modèle à nos approximations géométriques. D'autre part, nous nous sommes limités à des couvertures végétales relativement peu denses. Cela correspond sans doute mieux au cas de façades végétales de type "plantes grimpantes", mais ne permet pas de retomber sur les résultats généralement admis et utilisés pour des couverts plus denses.

L'analyse statistique des résultats souffre également de certains manques. Le choix des plages de variation des paramètres fait craindre que certains facteurs prennent trop d'importance dans les régressions linéaires, à la fois en fonction de la largeur de la plage de variation, de la répartition des valeurs sur ces plages (tantôt continues, tantôt discrètes) et de la variabilité des paramètres entre eux (certain trop souvent fixes par rapport à d'autres...). Il aurait fallu utiliser une méthode plus rigoureuse, même si le choix "instinctifs" des valeurs des paramètres et des plages de variation n'était pas non plus complètement hasardeux et nous aura peut être permis de rester un peu plus proche des phénomènes physiques. On pourrait également refaire les analyses statistiques avec les données existantes mais en réduisant le nombre par une sélection un peu plus méthodique des cas à considérer.

Enfin, la précision du modèle obtenu doit être mise au regard de la sensibilité des paramètres dans les modèles utilisés aux échelles supérieures et des approximations déjà réalisées dans ces modèles.

Compétences acquises

D'un point de vue personnel, ce travail de master m'a permis d'allier des champs de connaissances issues de trois domaines distincts :

- modélisation des plantes : physiologie et architecture végétale,
- urbanisme et architecture : intégration du végétal à l'environnement urbain,
- modélisation des échanges radiatifs urbains.

La méthode utilisée a demandé l'acquisition de compétences très diverses que ce soit pour la modélisation, le traitement des données, l'exploitation des résultats :

- modélisation : de la formulation des hypothèses de base à celle de modèles physiques simplifiés,
- simulation : utilisation et pilotage de SOLENE en prenant en compte un grand nombre de paramètres,
- programmation : maîtrise du langage interprété `python` pour la modélisation géométrique des plantes et le traitement des données issues des simulations,
- traitement des données : utilisation de méthodes statistiques et de "data mining".

La variété des nouveaux domaines abordés ne m'a pas permis de les explorer en profondeur, mais aura quand même constitué une introduction assez poussée à chacun d'entre eux.

Perspectives

Validation de la méthode Les modèles présentés précédemment n'ayant pas fait l'objet d'une validation expérimentale, il conviendrait au moins de les tester avec des hypothèses un peu plus précises. La méthode de simulation étant parfaitement mise au point, on pourrait simplement l'utiliser telle quelle avec une représentation géométrique plus proche de la réalité, en s'appuyant par exemple sur des observations de différents types de plantes et de leur architecture foliaire.

Prise en compte des interactions Comme on l'a vu au cours de ce rapport, les propriétés radiatives des feuilles dépendent de facteurs environnementaux. Mais elles vont aussi avoir une influence sur eux. Il y a donc une interaction qu'il pourrait être intéressant de considérer, par le moyen d'une approche itérative. On pourrait alors dire si, compte tenu des autres approximations, il est nécessaire de prendre en compte ces couplages.

Sensibilité des propriétés radiatives dans un modèle complet La nécessité de mettre au point un modèle simplifié de calcul des caractéristiques radiatives des couvertures végétales est apparue dans l'étude bibliographique compte tenu de sa variabilité en fonction des facteurs externes et de l'importance du terme lié aux rayonnements CLO dans l'équation de bilan thermique de la canopée végétale. Encore faut-il vérifier que ces paramètres restent déterminants dans un modèle à l'échelle urbaine où l'on doit par ailleurs faire de nombreuses approximations.

Bibliographie

- H. Akbari and S. Konopacki. Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy*, 33(6) :721–756, April 2005.
- H. Akbari, M. Pomerantz, and H. Taha. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3) :295–310, 2001.
- E. Alexandri and P. Jones. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment : Comparison with experimental results. *Building and Environment*, 42 :2835–2849, 2007.
- E. Alexandri and P. Jones. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43 (4) :480–493, Apr. 2008.
- J. Bouyer. *Modélisation et simulation des microclimats urbains : Impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*. PhD thesis, École d'architecture de Nantes, 2009.
- F. Choay. *L'urbanisme, utopies et réalités*. Édition du Seuil, 1965.
- D. Da Silva, F. Boudon, C. Godin, and H. Sinoquet. Multiscale framework for modeling and analyzing light interception by trees. *Multiscale Modeling and Simulation*, 7(2) :910–933, aug 2008.
- H. F. Di and D. N. Wang. Cooling effect of ivy on a wall. *Experimental heat transfert*, 12 :235–245, 1999.
- E. Eumorfopoulou and K. Kontoleon. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment*, 44 :1024–1038, 2009.
- R. Giridharan, S. Lau, S. Ganesan, and B. Givoni. Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal hong kong : The vegetation influence. *Building and Environment*, 43(10) :1583–1595, Oct. 2008.
- G. Guyot. *Climatologie de l'environnement : Cours et exercices corrigés*. Dunod, 2 edition, 1999.
- E. Howard. *Garden-Cities of Tomorrow*. Dunod (verion française), 1898.

- A. Hoyano. Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building. *Energy and Buildings*, 11 :181–199, 1988.
- green solutions*. Jakob Inoex Lines.
- J. Johnston and J. Newton. Building green : A guide to using plants on roofs, walls and pavements. Technical report, Mayor of London, 2004.
- R. Kumar and S. Kaushik. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment*, 40 :1505–1511, 2005.
- Y. V. . M. Labrecque. Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de littérature et tentative d’extrapolation au contexte montréalais. Technical report, IRBV, 2007.
- A. Lambertini and J. Leenhardt. *Jardins verticaux dans le monde entier*. Citadelles & Mazenod, 2007.
- A. Miller, K. Ip, K. Shaw, and M. Lam. Case study report - vegetation on building facades "bioshader". Technical report, Durabuild, 2004.
- T. R. Oke. *Boundary layer climates*. Routledge, 1987.
- E. Palomo. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27(2) :179–193, Apr. 1998.
- C. Pradal, S. Dufour-Kowalski, F. Boudon, C. Fournier, and C. Godin. Openalea : A visual programming and component-based software platform for plant modeling. *Functional Plant Biology*, 35(9 & 10) :751–760, 2008.
- M. Robitu. *étude de l’interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. PhD thesis, école d’architecture de Nantes, 2005.
- A. H. Rosenfeld, H. Akbari, S. Bretz, B. L. Fishman, D. M. Kurn, D. Sailor, and H. Taha. Mitigation of urban heat islands : materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 22(3) :255–265, August 1995.
- L. Shashua-Bar and M. Hoffman. The green cttc model for predicting the air temperature in small urban wooded sites. *Building and Environment*, 37 : 1279–1288, 2002.
- C. Tsoumarakis, Assimakopoulos, Tsiros, M. Hoffman, and A. Chronopoulou. Thermal performance of a vegetated wall during hot and cold weather conditions. In *PLEA 2008, 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin*, 2008.
- J. Vinet. *Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l’impact de l’eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. PhD thesis, Ecole d’Architecture de Nantes, 2000.
- L. Zaiyi and J. Niu. Study on thermal function of ivy-covered walls. In *Conference on architecture and technology for sub-tropical climates*, 1998.

Appendices

Annexe A

Nomenclature

τ	transmittivité équivalente de la couverture végétale
τ_f	transmittivité de la feuille
ρ	réflectivité équivalente de la couverture végétale
ρ_f	réflectivité de la feuille
ρ_m	réflectivité du mur
E	rayonnement incident sur le mur
E_{dir}	rayonnement direct incident sur le mur
E_{dif}	rayonnement diffus incident sur le mur
E_{inter}	rayonnement incident dû aux inter-réflexions
I_0	rayonnement incident sur une surface verticale
$I_{0,dir}$	rayonnement direct incident sur une surface verticale
$I_{0,dif}$	rayonnement diffus incident sur une surface verticale
tx_{dir}	taux de rayonnement direct sur une surface verticale
h	hauteur solaire
a_z	azimut solaire
$a_{z,rel}$	azimut solaire relatif à l'orientation de la façade
θ	angle d'inclinaison des feuilles par rapport à la verticale
LAI	densité surfacique de feuillage (pour <i>Leaf Area Index</i>)
LAD	densité volumique de feuillage (pour <i>Leaf Area Density</i>)
$couv$	taux de couverture de feuillage

Annexe B

Logiciels utilisés

À part SOLENE, tous les logiciels utilisés sont des logiciels libres, que ce soit pour la modélisation ou le traitement des données, ainsi que la rédaction de ce rapport :

Modélisation et traitement des données

SOLENE	Logiciel du CERMA pour la simulation radiative
Openalea, PlantGL	Logiciel de modélisation végétale Laboratoire AMAP – CIRAD <i>opensource – licence CECILL</i>
python, matplotlib	langage de programmation interprété <i>opensource – Python Software Foundation licence</i>
TANAGRA	logiciel de datamining <i>opensource</i>

Autre

L ^A T _E X	édition (<i>opensource – LLPL</i>)
The Gimp	traitement d'image (<i>opensource – GNU/GPL</i>)
Inkscape	graphisme (<i>opensource – GNU/GPL</i>)
Gnumeric	tableur (<i>opensource – GNU/GPL</i>)

Annexe C

script de pilotage de SOLENE (bash)

```
1 @echo off
3 set Start=%time%
echo d but : %Start%
5
set Hdebut=10:00
7 set Hfin=18:00
set pas=2:00
9
echo —— lecture des parametres ——
11
rem format d'une entre : "nom_de_la_geometrie ; nombre_feuille ;
angle_inclinansion_feuilles ; epaisseur_couche_de_feuilles ;
reflectivite_feuille ; transmittivite_feuille ;
orientation_de_la_facade"
13
for /F "eol=; tokens=2,4,6,8,10,12,14 delims=" %%h in (%1) do (
15 set geom=%%h
set nombre_feuille=%%H
17 set angle=%%j
set epaisseur=%%k
19 set reflectivite_feuille=%%l
set transmittivite_feuille=%%n
21 set orientation=%%n
)
23
set maille_feuille=0.102
25 set maille_mur=0.05
set nom_geom=%geom% %nombre_feuille% %angle% %epaisseur%
27 set nom_geom_bis=%geom% %nombre_feuille% %angle%
29 set /a nom_reflectivite=%reflectivite_feuille% * 100
set /a nom_transmittivite=%transmittivite_feuille% * 100
31
echo %nom_geom%
33 set nom=%nom_geom_bis% %nom_reflectivite% %nom_transmittivite% %
orientation%
echo %nom% %geom% %nombre_feuille% %angle% %epaisseur% %
reflectivite_feuille% %transmittivite_feuille% %orientation%>>
liste_cas.txt
35
cd process
37 mkdir %nom%
```

```

39 cd %nom%
40
41 echo #####
42 echo —— creation forme mur ——
43
44 echo 1 1 >> mur_forme.cir
45 echo 0 0 >> mur_forme.cir
46 echo 1e+006 1e+006 >> mur_forme.cir
47 echo -1e+006 1e+006 >> mur_forme.cir
48 echo -1e+006 -1e+006 >> mur_forme.cir
49 echo 1e+006 -1e+006 >> mur_forme.cir
50 echo f1 1 >> mur_forme.cir
51 echo -1 0 0 >> mur_forme.cir
52 echo c0 >> mur_forme.cir
53 echo 5 >> mur_forme.cir
54 echo 0 -3.5 0.5 >> mur_forme.cir
55 echo 0 3.5 0.5 >> mur_forme.cir
56 echo 0 3.5 7.5 >> mur_forme.cir
57 echo 0 -3.5 7.5 >> mur_forme.cir
58 echo 0 -3.5 0.5 >> mur_forme.cir
59 echo #####
60 echo —— Importation, preparation goemetrie ——
61
62 cd ..\..
63 cd geometrie\triangulation
64
65 if exist %nom_geom%_ext_double.cir goto :ext_double
66
67 inverse_normale ..\%nom_geom%_ext %nom_geom%_ext_op -n
68 translation %nom_geom%_ext_op -0.02 0 0.02 %nom_geom%_ext_op_trans
69 inverse_normale %nom_geom%_ext_op_trans %nom_geom%_ext_po -n
70 concatfic -m %nom_geom%_ext_op %nom_geom%_ext_po %nom_geom%
71 _ext_double
72
73 :ext_double
74
75 if exist %nom_geom%_centre_double_cir goto :centre_double
76 triangule_face ..\%nom_geom%_centre %nom_geom%_centre_tr %
77 maille_feuille% >> poubelle_tr_%nom_geom%.txt
78
79 inverse_normale %nom_geom%_centre_tr %nom_geom%_centre_op -n
80 translation %nom_geom%_centre_op -0.02 0 0.02 %nom_geom%
81 _centre_op_trans
82 inverse_normale %nom_geom%_centre_op_trans %nom_geom%_centre_po -n
83 concatfic -m %nom_geom%_centre_op %nom_geom%_centre_po %nom_geom%
84 _centre_double
85
86 :centre_double
87
88 copy %nom_geom%_ext_double.cir ..\..\process\%nom%
89 copy %nom_geom%_centre_double.cir ..\..\process\%nom%
90
91 cd ..\..\process\%nom%
92
93 set FinImport=%time%
94 echo "fin_de_l'importation: %FinImport%"
95
96 echo #####
97 echo —— Importation, preparation mur ——
98
99 triangule_face mur_forme mur %maille_mur% >> poubelle_tr.txt

```

```

97 df_surface mur surface_mur
   val_op_val surface_mur - surface_mur nul_mur
99 val_op_val nul_mur + 0.8 reflectivite_mur
   val_op_val nul_mur + 0 transmittivite_mur
101
102 :importmur
103
104 set FinImport=%time%
105 echo "fin_deul'importation:_%FinImport%"

107 echo --- creation transmittivite , reflectivite ---
108
109 df_surface %nom_geom%_ext_double %nom%_surface_ext
110 val_op_val %nom%_surface_ext - %nom%_surface_ext %nom%_nul_ext
   val_op_val %nom%_nul_ext + %transmittivite_feuille% %nom%
   _transmittivite_ext
111 val_op_val %nom%_nul_ext + %reflectivite_feuille% %nom%
   _reflectivite_ext

112 df_surface %nom_geom%_centre_double %nom%_surface_centre
   val_op_val %nom%_surface_centre - %nom%_surface_centre %nom%
   _nul_centre
113 val_op_val %nom%_nul_centre + %transmittivite_feuille% %nom%
   _transmittivite_centre
   val_op_val %nom%_nul_centre + %reflectivite_feuille% %nom%
   _reflectivite_centre

114
115 echo --- concatenation , creation scene ---
116
117 concatfic -m mur %nom_geom%_centre_double %nom%_scene
118 concatval -m transmittivite_mur %nom%_transmittivite_centre %nom%
   _transmittivite_scene
   concatval -m reflectivite_mur %nom%_reflectivite_centre %nom%
   _reflectivite_scene
119 df_surface %nom%_scene %nom%_surface_scene

120
121 echo --- concatenation , creation masques ---
122
123 concatfic -m %nom%_scene %nom_geom%_ext_double %nom%_masque
   concatval -m %nom%_transmittivite_scene %nom%_transmittivite_ext %nom%
   %_transmittivite_masque
124 concatval -m %nom%_reflectivite_scene %nom%_reflectivite_ext %nom%
   _reflectivite_masque

125
126 echo #####
127 echo --- masque ciel ---
128 set debutMasqueCiel=%time%
129 echo debut masque_ciel_lum : %debutMasqueCiel%

130
131 echo ##### 21/6
132 masques_ciel_lum %nom%_scene %nom%_masque %nom%_transmittivite_masque
   ..\ciel ..\angle_solid %Hdebut% %Hfin% %pas% ..\..\radiance\
   radiance_solaire_21_6 89.9 -1 %nom%_ray_incident_ciel_21_6

133
134 echo ##### 21/9
135 masques_ciel_lum %nom%_scene %nom%_masque %nom%_transmittivite_masque
   ..\ciel ..\angle_solid %Hdebut% %Hfin% %pas% ..\..\radiance\
   radiance_solaire_21_9 89.9 -1 %nom%_ray_incident_ciel_21_9

136
137 echo ##### 21/12

```

```

145 masques_ciel_lum %nom%_scene %nom%_masque %nom%_transmittivite_masque
    ..\ciel\..\angle_solid %Hdebut% %Hfin% %pas% ..\..\radiance\
    radiance_solaire_21_12 89.9 -1 %nom%_ray_incident_ciel_21_12
    :masquesol
147
149 echo #####
149 echo —— masque sol ——
    set debutMasqueSol=%time%
151 echo debut masque sol : %debutMasqueSol%

153 echo ##### 21/6
    masques_sol_lum %nom%_scene %nom%_masque %nom%_transmittivite_masque
        47 21/6 %Hdebut% %Hfin% %pas% 89.9 -1 %nom%_ray_incident_sol_21_6
155
157 echo ##### 21/9
    masques_sol_lum %nom%_scene %nom%_masque %nom%_transmittivite_masque
        47 21/9 %Hdebut% %Hfin% %pas% 89.9 -1 %nom%_ray_incident_sol_21_9

159 echo ##### 21/12
    masques_sol_lum %nom%_scene %nom%_masque %nom%_transmittivite_masque
        47 21/12 %Hdebut% %Hfin% %pas% 89.9 -1 %nom%
        _ray_incident_sol_21_12
161
163 for %D in (21_6, 21_9, 21_12) do (
163     for %H in (10H00, 12H00, 14H00, 16H00, 18H00) do (
        val _op_val %nom%_ray_incident_ciel_%D_%H + %nom%
        _ray_incident_sol_%D_%H %nom%_ray_incident_total_avt_%D_%H
165     )
166     )
167
169 :facform
171 echo #####
171 echo —— facform lum ——
    set debutFacform=%time%
173 echo debut facform : %debutFacform%
    facform_lum %nom%_scene %nom%_scene %nom%_transmittivite_scene 0 %nom%
        %_faf %nom%_ff_in %nom%_ff_out
175
177 echo #####
177 echo —— radiosite lum ——
    set debutRadiosite=%time%
179 echo debut radiosite : %debutRadiosite%

181 echo ##### 21/6
    for %H in (10H00, 12H00, 14H00, 16H00, 18H00) do radiosite_lum %nom%
        _ray_incident_total_avt_21_6_%H %nom%_reflectivite_scene %nom%
        _faf %nom%_surface_scene %nom%_ray_incident_apr_21_6_%H %nom%
        _ray_reflechi_apr_21_6_%H %nom%_ray_absorde_apr_21_6_%H e 25 >>
        poubelle_radiosite.txt
183
185 echo ##### 21/9
    for %H in (10H00, 12H00, 14H00, 16H00, 18H00) do radiosite_lum %nom%
        _ray_incident_total_avt_21_9_%H %nom%_reflectivite_scene %nom%
        _faf %nom%_surface_scene %nom%_ray_incident_apr_21_9_%H %nom%
        _ray_reflechi_apr_21_9_%H %nom%_ray_absorde_apr_21_9_%H e 25 >>
        poubelle_radiosite.txt
187 echo ##### 21/12
    for %H in (10H00, 12H00, 14H00, 16H00, 18H00) do radiosite_lum %nom%
        _ray_incident_total_avt_21_12_%H %nom%_reflectivite_scene %nom%
        _faf %nom%_surface_scene %nom%_ray_incident_apr_21_12_%H %nom%

```

```
    _ray_reflechi_apr_21_12_%%H %nom%_ray_absorde_apr_21_12_%%H e 25
    >> poubelle_radiosite.txt
189
    set End=%time%
191 echo debut de la simulation : %start%
    echo fin : %End%
193 cd ..\..
```