



HAL
open science

Approche physico-morphologique de l'albedo effectif: vers une stratégie de forme et de matériaux urbains

Ons Ben Messaoud

► **To cite this version:**

Ons Ben Messaoud. Approche physico-morphologique de l'albedo effectif: vers une stratégie de forme et de matériaux urbains. Architecture, aménagement de l'espace. 2009. dumas-00469765

HAL Id: dumas-00469765

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00469765>

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
SPECIALITE AMBIANCES ET FORMES URBAINES

Année 2008/2009

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

Présentée et soutenue par :

BEN MESSAOUD ONS

le 30/09/2009

à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes

APPROCHE PHYSICO-MORPHOLOGIQUE DE L'ALBEDO EFFECTIF

VERS UNE STRATEGIE DE FORME ET DE MATERIAUX URBAINS

JURY

Président : Marjorie MUSY, Ingénieur de recherche, Agrégée de l'ENS Cachan,
Docteur en génie civil, HDR.

Examineurs : Pascal JOANNE, Architecte DPLG, Docteur en sciences de l'ingénieur
option architecture, Maître assistant des Ecoles d'architecture - Nantes
Francis MIGUET, Architecte DPLG, Docteur en sciences de l'ingénieur
option architecture, Professeur des ENSA - Paris Malaquais

Directeur de mémoire : Marjorie MUSY

Laboratoire/Institution : Laboratoire CERMA UMR CNRS 1563

RESUME

Les préoccupations actuelles des acteurs urbains consistent principalement en la maîtrise de la situation environnementale en termes de lutte contre tout phénomènes nuisant au confort et bien être du citoyen. Les scientifiques ont tiré la sonnette d'alarme pour prévenir les risques encourus par la population urbaine, il y a beau temps de cela. L'îlot de chaleur urbain est l'une des menaces qui pèsent lourd sur les villes. Il est à l'origine des vagues de chaleur, responsables à leur tour de la surmortalité enregistrée dans les grandes agglomérations. Nous nous intéressons dans ce travail à l'estimation de la contribution de la forme urbaine à ce phénomène, en faisant varier ses paramètres géométriques et physiques. L'albédo effectif sera le critère d'appréciation de la capacité du piégeage solaire des configurations étudiées.

Outre l'étude des facteurs de la densité et de la hauteur des bâtiments, nous allons aborder l'inclinaison des façades, un facteur n'ayant pas fait l'objet d'étude. Nous allons montrer que l'albédo effectif fluctue de manière complexe en fonction de l'angle d'inclinaison et de l'orientation des façades affectées. Ce serait une piste pour avancer une ou plusieurs stratégies de forme. D'autre part, l'étude de l'hétérogénéité des matériaux urbains relativisera les constats antérieurs relatifs aux effets du cycle saisonnier et de l'orientation sur l'albédo effectif. A l'issue de cette dernière approche, nous allons non seulement statuer sur l'importance des propriétés réfléchives des surfaces urbaines dans l'absorption urbaine, mais également parvenir à avancer des stratégies d'attribution de matériaux urbains en fonction de l'orientation des façades, suivant les caractéristiques saisonnières.

Pouvoir moduler l'absorption urbaine en fonction des saisons revient à réduire les impacts des surchauffes estivales et favoriser les apports énergétiques hivernaux. Toutes les recommandations serviront d'outils d'aide à la décision aux acteurs urbains en phase de conception, notamment à l'échelle des projets urbains, une échelle au niveau de laquelle l'impact du choix des formes et de l'attribution des matériaux est important.

Mots-clés : îlot de chaleur urbain, albédo effectif, forme urbaine, inclinaison des façades, matériaux urbains, orientations, absorption, stratégies.

Discipline : Architecture

Avant-propos

J'ai été accueilli au laboratoire CERMA, à l'école Nationale d'Architecture de Nantes, avec beaucoup de respect. Durant les six mois de stage, j'ai pu élaborer ce travail dans un environnement où règne une ambiance amicale et très propice à la recherche.

Je voudrais adresser mes profonds remerciements et ma gratitude envers Madame Marjorie MUSY, responsable de la spécialité AFU du Master STEU, pour son encadrement consciencieux et ses précieux conseils. Je lui suis infiniment reconnaissant pour tout ce qu'elle a fait pour moi, sa gentillesse, sa patience et son dévouement pour la recherche.

Je tiens à remercier Monsieur Pascal JOANNE, le directeur du CERMA, de m'avoir accueilli au laboratoire à bras ouvert.

Mes remerciements vont également à Martine CHAZELAS pour son dévouement à son travail, au soutien des jeunes chercheurs et surtout pour son écoute et sa disponibilité.

Enfin, je remercie tous ceux et celles que je connais au CERMA, chercheurs, doctorants et personnels administratifs.

SOMMAIRE

Contexte de la recherche (p.5)

Thème de la recherche : Problématique abordée (p.6)

Littérature et Obstacles (p.7)

Questionnements (p.9)

Hypothèses (p.11)

Objectifs et Méthodologie de Travail (p.13)

A. LES PHENOMENES OPTIQUES ET THERMIQUES DANS LE MILIEU URBAIN.....	17
I. Le comportement optique des materiaux.....	17
II. Le comportement optique au sein de la forme urbaine.....	23
III. Le comportement thermique des materiaux	27
B. LES EFFETS DE LA MORPHOLOGIE URBAINE SUR L'ALBEDO EFFECTIF	30
I. L'irregularite de la forme urbaine.....	30
II. Les dimensions de la trame urbaine.....	31
III. La hauteur de la canopee urbaine.....	32
IV. La densite urbaine	35
V. Le facteur de vue de ciel (svf)	39
VI. La typologie du tissu urbain.....	42
C. LES EFFETS DES FACTEURS SPATIO-TEMPORELS.....	43
I. Generalites	43
II. L'effet de la variation diurne et saisonniere.....	44
III. L'effet de l'orientation du tissu urbain	47
IV. L'influence de la latitude	49
D. CONCLUSION DE L'ETAT DE L'ART	50
E. OBJECTIF ET METHODOLOGIE D'APPROCHE.....	55
I. Objectif.....	55
II. Les variables morphologiques	56
III. Les variables spatio-temporelles.....	57
IV. Les variables physiques.....	58
V. Les contributions des surfaces urbaines a l'albedo effectif.....	61
VI. Les effets de l'heterogeneite des materiaux sur l'albedo effectif	61
F. LA METHODOLOGIE DE SIMULATION ET D'EXPLOITATION DES RESULTATS.....	64
I. Le masque.....	64
II. La zone de simulation.....	64

III. La zone d'analyse.....	65
IV. Les parametres d'entree dans solene.....	66
V. La mise en place de la methode de calcul de l'albedo effectif.....	67
VI. Le recours au script et aux commandes solene externes.....	73
VII. La methode des plans d'experiences.....	75
G. L'ANALYSE DU TISSU DE TYPE PLOT.....	80
I. L'effet de l'orientation de la forme urbaine.....	80
II. L'effet de la variation dimensionnelle de la forme urbaine.....	81
III. Les precautions d'emploi de la methode des plans d'experiences.....	96
IV. Les contributions des surfaces urbaines.....	98
V. Strategie des formes urbaines.....	107
VI. L'approche physique du tissu plot.....	109
VII. Strategie d'attribution des materiaux urbains.....	120
H. ANALYSE DU TISSU DE TYPE CANYON.....	125
I. Objectifs et methodologie.....	125
II. L'effet de l'inclinaison des façades.....	126
III. Les contributions des surfaces urbaines a l'albedo effectif.....	129
IV. L'approche physique du canyon est ouest.....	138
V. L'approche physique du canyon nord sud.....	147
VI. Strategie des formes et des materiaux urbains du tissu canyon.....	152
I. LES RESULTATS DE LA RECHERCHE.....	157
I. Methode d'approche et d'exploitation des resultats.....	157
II. Les resultats des analyses de la forme urbaine.....	158

CONTEXTE DE LA RECHERCHE

L'environnement urbain : la ville, aujourd'hui et demain

Les constats d'une ville contemporaine révèlent l'état critique dans lequel on est aujourd'hui. Plusieurs menaces inhérentes à l'urbanisation accrue des villes ont surgi à l'orée du troisième millénaire. Ce thème est désormais le plus abordé par les acteurs de la ville et acquiert une dimension d'autant plus importante qu'il concerne toutes les nations.

Ayant subi de grandes mutations morphologiques et spatiales (étalement, densification, construction en hauteur etc.), les villes souffrent de problèmes environnementaux, énergétiques et sanitaires. Les nuisances sonores, olfactives, la pollution de l'air, la pollution de l'eau et des milieux aquatiques et les gênes thermo aérauliques constituent les principales sources d'inconfort qui différencie le milieu urbain des paysages campagnards, propres et sereins.

Aujourd'hui, plusieurs approches visent à remédier aux risques encourus par les villes et à créer des conditions de vie meilleures. Parmi celles-ci, les approches morphologiques de l'environnement urbain. L'objectif est de proposer des outils d'aide à la conception et des stratégies en termes de planification urbaine, d'ajustement des formes, de gestion des ressources énergétiques etc. C'est dans ce cadre précis que s'inscrit notre thème de recherche. Nous adopterons une approche physico-morphologique pour aborder l'un des phénomènes contribuant à l'îlot de chaleur urbain. Il s'agit de l'étude de ce qu'on appelle « albédo effectif », un indicateur qui mesure le pourcentage d'absorption solaire (rayonnement de courte longueur d'onde) de la forme urbaine.

PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

Contribution de l'albédo effectif à l'îlot de chaleur

Qu'est ce que l'îlot de chaleur urbain ?

Le phénomène d'îlot de chaleur consiste en l'observation d'un écart de température entre la ville et les campagnes environnantes¹. Cette différence de température entre deux sites pourtant proches a laissé conclure que le principal facteur influant sur ce phénomène serait probablement la morphologie du bâti ainsi que les matériaux de surface qui varient d'un lieu à un autre. La singularité du phénomène de l'îlot de chaleur n'a été affirmée et communément admise qu'après maintes expériences faites récemment. Avec le progrès de la science, des techniques et outils de recherche, on a pu appréhender le phénomène à une échelle plus réduite rendant ainsi compte des détails les plus infimes. On a pu déduire les raisons de cet écart de température entre villes et campagnes. En effet, derrière l'accroissement des agglomérations urbaines, en taille et en population, se cachent d'autres aspects influant sur l'îlot de chaleur tels que la morphologie du bâti et les propriétés physiques des matériaux de construction. D'autre part, les conditions climatiques (influence de la végétation, de l'eau...) et météorologiques (vitesse du vent par exemple) jouent aussi un rôle prépondérant dans l'appréciation de la température dans le milieu urbain.

Par ailleurs, le phénomène d'îlot de chaleur se distingue aussi par l'étendue de ses atteintes et la nature de ses dommages. Il touche aussi bien aux aspects environnementaux qu'énergétiques (surconsommation d'énergie) et sanitaires (problèmes hygiéniques due à la hausse des températures, mortalité etc.). Il apparait donc que le phénomène de l'îlot de chaleur urbain concerne deux des trois principaux piliers du développement durable relatifs à l'aspect environnemental (ressources, écosystème) et social (santé, confort, usage)² d'où sa place au sein des préoccupations actuelles. Résoudre tous ces problèmes revient à opter pour des principes préventifs. Pour ce faire, il est nécessaire de repenser la ville autrement.

Qu'est ce que l'albédo ? Albédo effectif ou Albédo de surface ?

L'îlot de chaleur urbain a fait l'objet d'approches interdisciplinaires dont la diversité montre la complexité du phénomène et la difficulté de tenir compte de tous les paramètres en cause. Parmi ces approches, l'étude du piégeage

¹ Cour de M. Musy (Master STEU)

² Cour de B. PEUPRTIER sur l'Eco-conception des bâtiments (Master STEU).

solaire de la forme urbaine, quantifié par le moyen de l'albédo effectif : Il s'agit d'un indicateur physique défini comme étant le rapport entre le rayonnement de courte longueur d'onde réfléchi vers le ciel et l'énergie globale incidente. Pour désigner la propriété optique d'un matériau ou d'une surface donnée, on parle plutôt d' « albédo de surface » ou « réflectivité ».

LITTERATURE ET OBSTACLES

On a étudié la variation des valeurs d'albédo en variant plusieurs paramètres spatio-temporels (orientation et hauteur solaire), morphologiques ou matériels afin de dégager les conditions qu'il faudrait éviter ou avantager selon les caractéristiques du climat. Bien que les méthodes d'approches morphologiques d'albédo effectif soient très diverses (divers modèles de simulation, configurations morphologiques étudiées différentes, choix des conditions d'expérimentation ou de calcul etc.), nous allons quand même citer les paramètres sur lesquels on a le plus souvent débattu :

LES MATERIAUX URBAINS

Que ce soit au niveau des façades, des toits ou du sol, les matériaux influent sur l'albédo urbain. Les propriétés optiques (albédo de surface), la texture et la couleur sont les principales caractéristiques des matériaux qui modulent le pouvoir réfléchissant ou absorbant du rayonnement solaire.

Limite 1 : on a le plus souvent étudié les matériaux, isolément, en dehors de leur contexte urbain (façades, toits et sol) et suivant des orientations diverses.

Limite 2 : En vue de simplifier les modélisations, on a souvent utilisé des valeurs standards d'albédo de matériaux les plus couramment utilisés. Mais on n'a pas suffisamment attribué d'importance à l'hétérogénéité de composition de la surface urbaine.

Limite 3 : Manque de stratégies en termes d'attribution de matériaux urbains aux surfaces différemment orientées et selon les besoins...

LA FORME URBAINE

À travers l'étude de la structure urbaine on a pu statuer sur la contribution de certains facteurs au piégeage solaire et donc à l'albédo effectif (hauteur des bâtiments, densité, facteur de vue de ciel etc.).

Limite1 : On a souvent modélisé des formes simples qui ne correspondent pas tout à fait au contexte réel urbain (tels que les tissus organiques avec des rues sinueuses parfois etc.).

Limite2 : L'étude d'inclinaison des façades ou des toitures a rarement concerné la problématique d'îlot de chaleur.

LATITUDE, HAUTEUR SOLAIRE ET ORIENTATION

L'influence de ces facteurs sur l'albédo effectif a fait l'objet de plusieurs investigations et méthodologies d'approche :

Limite : l'obstacle réside dans la difficulté de comparer les résultats émanant des diverses recherches. Les calculs d'albédo effectif peuvent différer essentiellement à cause de la différence des méthodes d'approches et des conditions de simulations.

LES QUESTIONNEMENTS

Les effets de la hauteur de la canopée urbaine et de la densité sont les plus abordés dans la littérature. Aujourd'hui, malgré qu'il existe une tendance à incliner les surfaces de toitures et de façades, à grande échelle des fois (enveloppes solaires¹, architecture photovoltaïque, « *the residential solar block* »²...), le facteur d'inclinaison des façades n'a pourtant pas fait l'objet d'étude en termes d'albédo effectif.

1. *La variation de l'angle d'inclinaison des façades d'un bâtiment influence-t-elle sur l'albédo effectif ?*
2. *Peut-on avancer des stratégies de formes au terme de cette étude ?*

Nous essaierons d'élucider les raisons de la variation complexe de l'albédo effectif en lien avec la densité urbaine : Il doit y avoir une explication rationnelle à la déviation de la courbe de tendance au niveau de la densité 30% (GROLEAU, 2008).

3. *Quelle est la raison de cette déviation ?*

Quant à la problématique des matériaux urbains, nous savons pertinemment que leur choix influence sur l'absorption urbaine. Mais, rares sont les recherches qui ont abordé la question de la diversité de réflectivité des matériaux de surfaces³.

4. *La densité caractéristique 30% peut-elle avoir d'autres influences typiques ?*
5. *Quel est l'impact de l'hétérogénéité de matériaux de surface sur les tendances saisonnières de variation de l'albédo effectif ?*
6. *Quel serait l'effet de l'orientation du tissu urbain dans ce cas ?*
7. *Quel serait l'effet de l'hétérogénéité des matériaux sur la tendance typique de variation de l'albédo effectif avec la densité ? l'albédo serait-il encore minime pour la densité 30% ?*

¹ KNOWLES, R. L. (1999). *The solar envelope*. 10. California.

² OKEIL, A. (2004), *In search for energy efficient urban forms: The Residential Solar Block*. Proc. of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction Conference, (p. 10). Toronto, Canada.

³ CHIMKLAI, P., HAGISHIMA, A., & TANILOTO, J. (2004). *A computer system to support albedo calculation in urban areas*. 11.

8. *L'influence de la forme urbaine sur l'albédo effectif est prépondérante pour le cas d'un albédo de surface homogène. La forme urbaine aurait-elle le même poids si on fait varier les matériaux ?*

L'étude de plusieurs combinaisons géométriques et physiques, selon une méthode spécifique d'attribution des matériaux de surfaces, lèvera le voile sur les lieux du piégeage solaire.

9. *Quelle est le poids des façades différemment orientées dans l'absorption solaire ?*
10. *Peut-on avancer des stratégies d'attribution de matériaux urbains en fonction des caractéristiques saisonnières ?*

LES HYPOTHESES

En réponses aux questionnements posés, nous admettons que :

1. L'inclinaison des façades ainsi que le nombre de façades inclinées par bâtiment influent sur l'absorption de la forme urbaine. L'effet peut être complexe en fonction de l'orientation des façades affectées.
2. Il est possible d'avoir une ou des stratégies d'inclinaison des façades en termes d'albédo effectif, selon le contexte urbain morphologique (densité surfacique) et des caractéristiques saisonnières.
3. Les simulations et les analyses nous révéleraient probablement l'origine de la rupture que connaît la variation de l'albédo effectif au niveau de la densité 30%, pour le tissu Plot. Nous émettons comme hypothèse que l'une des surfaces urbaines élémentaires (le sol, les façades ou les toits) est la cause directe de cette fluctuation complexe de l'albédo.
4. La densité caractéristique « 30% », point de rupture du sens de variation de l'albédo (GROLEAU, 2008), présente une influence typique sur de nombreux phénomènes dont les contributions des surfaces urbaines à l'albédo effectif.
5. Le mode d'affectation des matériaux de surfaces peut avoir une influence complexe sur la variation saisonnière de l'albédo effectif. Selon le contexte urbain (densité, hauteur), l'albédo peut subir une augmentation, une baisse ou même demeurer constant en fonction de la hauteur solaire (mois de décembre, mars et juin).
6. Dans la mesure où l'albédo effectif est sensible à la hauteur solaire, il dépend aussi de l'orientation du tissu urbain.
7. L'hétérogénéité des matériaux de surfaces peut relativiser la règle qui dit que, pour n'importe quelle hauteur de bâtiments, l'albédo est minime au niveau de la densité 30%, pour n'importe quelle hauteur de bâtiment.
8. En présence de matériaux divers, l'influence de la forme urbaine (dimensions) s'estompe. Il serait difficile de mener des études comparatives entre les villes en tenant compte uniquement des caractéristiques géométriques (hauteur, densité...).

9. Le phénomène du piégeage solaire est dû à l'absorption accrue de certaines surfaces plus que d'autres, en fonction du critère de l'orientation.
10. Il est possible d'adopter une stratégie de matériaux urbains en fonction de l'orientation des façades pour les deux tissus Plot et Canyon.

OBJECTIFS ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL

L'approche physico-morphologique de l'albédo effectif va nous permettre de proposer quelques recommandations pour lutter contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Dans la première partie de ce rapport (l'état de l'art), nous n'allons pas nous restreindre aux facteurs géométriques et spatiotemporels. Les phénomènes radiatifs optiques et thermiques seront également abordés à différentes échelles.

Le premier chapitre sera consacré à l'étude des comportements optiques à l'échelle du matériau (LARSEN et LESIONO, 2003 ; PEDERIT et DE HERDE, 2003 ; AIDA, 1982 ; COHEN et SMALL), du quartier (CHERQUI et al. 2005 ; FLORY-CELINI, 2006) puis à l'échelle urbaine (GROLEAU, 2008). En fait, nous allons nous rendre compte de la sensibilité d'une panoplie de matériaux opaques et translucides à l'angle d'incidence solaire. Nous situer dans un contexte urbain, va nous rendre lisible le comportement des flux solaires réfléchis en interrelation avec la forme urbaine. A terme de ce premier chapitre, seront abordés les effets des combinaisons de facteurs tels que l'hétérogénéité des matériaux de composition des façades et l'orientation, sur quelques phénomènes thermiques (température de surface des matériaux, température d'air...).

Dans le deuxième et le troisième chapitre, nous nous intéressons respectivement aux facteurs morphologiques et spatiotemporels ayant fait l'objet d'étude en terme d'albédo effectif. Plusieurs recherches seront présentées dont certaines aboutissent à des tendances complexes de variations de l'albédo (GROLEAU, 2008) ou encore des lois (AIDA, 1982).

La partie analytique (expérimentale) va être entièrement consacrée à l'expérimentation de nouvelles formes urbaines en fonction de plusieurs combinaisons de facteurs morphologiques et physiques (réflectivité des surfaces). Les résultats des simulations vont nous permettre d'avancer des recommandations en termes de formes et de matériaux urbains, une sorte de mesures préventives pour lutter contre le phénomène d'îlot de chaleur.

ETAT DE L'ART

A. LES PHENOMENES OPTIQUES ET THERMIQUES DANS LE MILIEU URBAIN

Les mutations microclimatiques encourues par les villes sont dues, en partie, aux matériaux urbains. En effet, les propriétés optiques et thermiques des surfaces urbaines contribuent fortement au phénomène d'îlot de chaleur. L'intensité de ces effets dépend également d'autres facteurs extrinsèques comme l'exposition des façades, l'angle d'incidence solaire ou encore l'intensité des rayonnements.

L'étude du comportement optique des matériaux fera l'objet d'étude de la première partie de ce chapitre. Nous aborderons ensuite les inter-réflexions à l'échelle d'un quartier avant de conclure par l'étude, à l'échelle plus globale, des contributions des surfaces urbaines à l'albédo effectif. La deuxième partie sera consacrée à l'étude des phénomènes thermiques et l'effet conjoint de l'orientation et de l'hétérogénéité des surfaces urbaines.

I. LE COMPORTEMENT OPTIQUE DES MATERIAUX

1. Les matériaux translucides

a) Les matériaux de façades

DOS SANTOS et *al.* (2003) définissent le facteur solaire (*Solar Heat Factor* ou SHF) comme étant la somme de la transmission solaire directe et la portion énergétique transmise après absorption par le vitrage. Ce facteur varie en fonction de l'intensité et l'angle d'incidence solaire. Le (SHF_{rel}) ou facteur solaire relatif, lui, est défini comme étant le rapport entre le facteur solaire pour un angle incidence quelconque et celui mesuré pour une incidence normale au matériau considéré ($SHF_{rel} (\%) = SHF_{inc.} / SHF_{norm.}$). La figure 1 illustre la tendance de variation du SHF_{rel} pour certains matériaux translucides

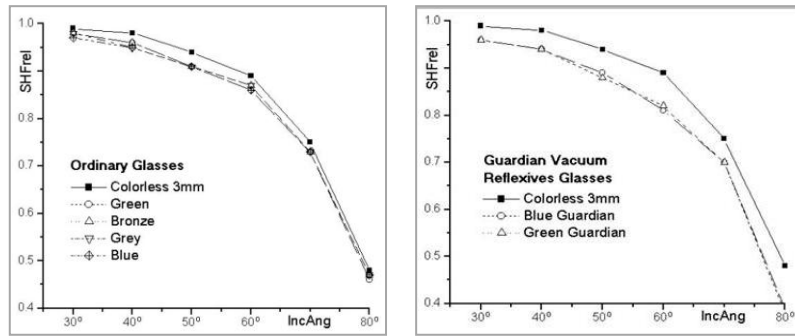


Figure 1 : La variation du facteur solaire relatif (SHF_{rel}) d'un vitrage ordinaire (à gauche) et d'un vitrage traité (à droite) en fonction de l'angle d'incidence ($IncAng$).

J.C.P. dos SANTOS et al. (2003)

Pour un vitrage transparent ordinaire, l'énergie transmise à l'intérieur du bâtiment et d'autant plus faible que l'angle d'incidence solaire est élevé. D'autres types de vitrages ordinaires (vert, bronze, gris et bleu) suivent la même tendance de variation mais avec des écarts variés. La transmission de tous ces matériaux translucides subit une déviation plus importante à partir de l'angle d'incidence 50° . Ce qui est important à retenir est qu'au niveau des angles d'incidence élevés, le facteur solaire des matériaux non traités diminue à cause de la réduction des flux directs transmis, et cette diminution se fait au profit des flux réfléchis vers l'extérieur. En ce qui concerne les matériaux traités (colorés ou teintés), l'augmentation des mêmes flux spéculaires se fait au dépend des flux absorbés par le vitrage et non des flux transmis.

Nous pouvons conclure qu'il existe une panoplie de matériaux translucides contribuant à l'augmentation des flux spéculaires en milieu urbain, notamment aux alentours des horaires de midi (angle d'incidence élevé).

b) Les matériaux de couverture de bâtiments

L'étude menée par **LARSEN et LESINO (2003)** met l'accent sur l'influence de l'angle d'incidence solaire sur le comportement de certains matériaux translucides utilisés pour couvrir certains espaces comme les atriums et les jardins d'hiver... Cette étude se distingue de la précédente en ce qu'elle met en avant l'effet des propriétés géométriques (fig2) et directionnelles du matériau lui-même sur les tendances du comportement optique.

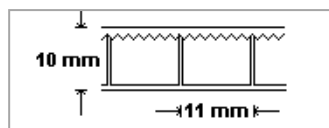


Figure 2 : Coupe sur la paroi du polycarbonate d'angle sélectif. *LARSEN et LESINO (2003)*

L'analyse comparative de trois types de matériaux translucides a permis de statuer sur l'originalité du polycarbonate traité en comparaison avec des matériaux réputés ordinaires. Plusieurs aspects avantageux ont apparus suite à de nombreux tests, faisant varier des paramètres géométriques, directionnels et solaires (fig3) :

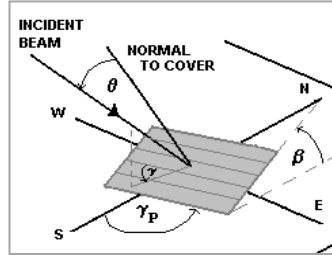


Figure 3 : Vitrage en polycarbonate d'angle sélectif, avec illustration des paramètres solaires et géométriques de la paroi. LARSEN et LESINO. (2003).

- L'angle d'incidence (θ): L'angle que font le faisceau solaire incident et la normale à la paroi. Il varie entre 0° et 90° .
- Azimut (γ) : L'angle que fait la direction des lamelles du polycarbonate avec la projection du faisceau solaire sur la paroi. Il varie lui aussi entre 0° et 90°
- L'inclinaison de la paroi (β) : L'angle d'inclinaison de la paroi en polycarbonate avec la surface horizontale.
- Azimut de la paroi (γ_p) : L'angle que font la direction des lamelles et l'axe du sud.

▪ **Comportement à l'égard du spectre visible**

Le polycarbonate traité (dénommé aussi polycarbonate d'angle sélectif) présente une faible transmission des rayonnements visibles grâce aux prismes triangulaires constitutifs de sa membrane supérieure (fig2). Cette propriété lui vaut d'être un matériau conçu pour des climats chauds (LARSEN et LESINO).

▪ **Comportement singulier en Fonction de l'angle d'incidence**

La transmission énergétique du polycarbonate d'orientation EO des lamelles est d'autant plus faible que l'incidence solaire est normale : Ce comportement est valable pour une incidence comprise entre 0° et 25° (fig.4). On voit bien que la tendance diffère beaucoup de celle du vitrage ordinaire (fig.5).

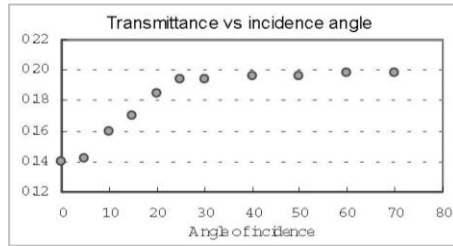


Figure 4 : La variation de la transmission du polycarbonate traité en fonction de l'angle d'incidence pour $\gamma = 90^\circ$. LARSEN et LESINO (2003)

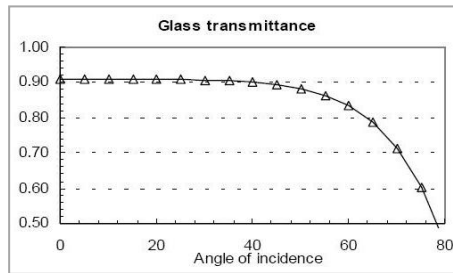


Figure 5 : La variation de la transmission d'un vitrage simple en fonction de l'angle d'incidence. LARSEN et LESINO (2003)

▪ **Comportement saisonnier**

D'après les courbes des moyennes de transmission horaire aux deux solstices d'été et d'hiver, le polycarbonate d'orientation EO s'adapte mieux aux caractéristiques saisonnières. Les apports estivaux (mois de décembre pour la latitude 24°S) sont les plus faibles en comparaison avec d'autres types de vitrages. Quand aux transmissions hivernales (au mois de Juin pour la latitude 24°S), elles sont réduites mais de façon beaucoup moins rapide que les transmissions des autres matériaux translucides : La baisse est de l'ordre de 100 unités vers midi alors qu'elle est de 200 à 250 unités dans les autres cas. (fig.6).

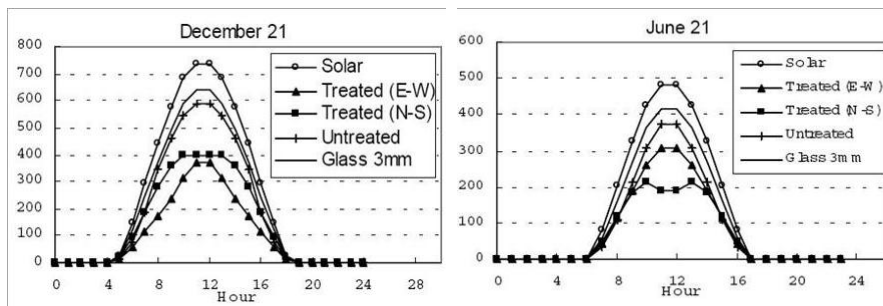


Figure 6 : Mesures de moyennes horaires de transmission énergétique pour différents matériaux translucides pour les saisons d'été (21 décembre) et d'hiver (21 juin).Latitude 24°Sud LARSEN et LESINO (2003)

Si l'on rapporte les mesures sur l'année et pour la même latitude 24°S, il devient encore plus évident que le polycarbonate permet de moduler les flux solaires en fonction des caractéristiques saisonnières. En effet, en termes de fraction d'énergie transmise (%), les gains hivernaux sont de l'ordre de 60% alors que les gains estivaux ne dépassent pas 45%. De l'autre côté, le polycarbonate orienté NS aussi bien que les autres types de vitrages, sont des matériaux moins adaptés (fig.7).

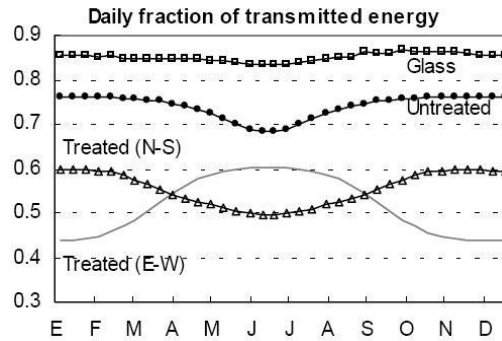


Figure 7 : Fraction diurne d'énergie solaire transmise pour différents matériaux translucides durant l'année. LARSEN et LESINO (2003).

En guise de conclusion, nous pouvons dire qu'il existe bel et bien des matériaux, que ce soit au niveau des toitures ou des façades des bâtiments, qui s'adaptent aux caractéristiques saisonnières. Ils assurent le mieux que possible le confort à l'intérieur des édifices, mais peuvent aussi moduler les flux spéculaires dans le tissu urbain, d'où l'intérêt d'étudier leur impact sur le microclimat urbain.

2. Les matériaux opaques

La sensation lumineuse est produite grâce à la transformation du flux énergétique émis par le soleil (rayonnement électromagnétique de longueur d'ondes comprises entre $0.38\mu\text{m}$ et $0.78\mu\text{m}$) en flux lumineux (Saint Gobain Vitrage. 1996). La loi de Lambert (COHEN et SMALL) montre que la diffusion de la lumière est tributaire des caractéristiques réfléchives des surfaces. Cette loi établit le lien entre l'intensité de ce flux lumineux incident (I_0), l'intensité du rayonnement diffusé au niveau d'un point de la surface (I_{0s}) et ce qu'on appelle angle polaire de diffusion (θ) : l'angle selon lequel la lumière sera réfléchi : $I(\theta) = I_0 \cos(\theta)$ (fig8).

Si nous avons abordé ces définitions c'est pour avancer une étude qui a tenté de classer les surfaces de matériaux selon ces critères de diffusion de la lumière. PIDERIT et DE HERDE (2003) ressortent trois catégories de surface. Les surfaces réfléchissantes réfléchissent la lumière vers une direction prédominante et leurs textures peuvent modifier l'angle de dispersion de la lumière. Les surfaces semi-réfléchissantes se comportent comme étant des surfaces mates ou brillantes selon l'angle d'incidence et l'intensité du

rayonnement lumineux. Elles peuvent réfléchir un mélange de diffus-spéculaire ou exclusivement du diffus (fig9). Enfin, les surfaces mates diffusant la lumière de manière uniforme telles que les peintures satin et quelques revêtements en plastique.

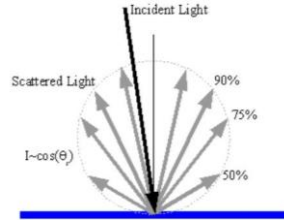


Figure 8 : Le flux lumineux incident et l'angle polaire de l'énergie diffuse par la surface. COHEN et SMALL. Source: <http://www.4physics.com/tn3/lambertian.htm>

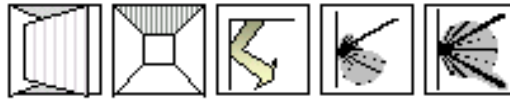


Figure 9 : L'effet des caractéristiques réfléchives des surfaces sur leur comportement optique, en fonction de l'angle d'incidence lumineux mais aussi de l'intensité de la source. PIDERIT et DE HERDE (2003)

Cette classification met en avant le potentiel de certaines surfaces à se comporter différemment en fonction de l'angle d'incidence et de l'intensité du rayonnement solaire (grâce au polissage de la matière, certaines peintures laquées...).

L'étude de AIDA (1982) lève le voile sur un phénomène qui explique bien les différences des constats de plusieurs recherches (fig.10). L'auteur a évalué l'effet des caractéristiques réfléchives des surfaces sur l'albédo effectif. Une géométrie urbaine dotée d'un matériau de surface de comportement 100% spéculaire ($\alpha=1.0$), se voit son albédo effectif régresser en fonction de l'angle zénithal solaire jusqu'à la valeur d'angle 60° . Une réflexion de type 100% diffuse ($\alpha=0.0$) donne une tendance différente : L'albédo effectif augmente en fonction du même angle au zénith. AIDA rajoute que dans le contexte urbain réel, les matériaux de surface sont plutôt d'aspect rugueux, et donc de comportement réfléchif plutôt diffus (une valeur α inférieure à 0.5).

¹ α : évalue selon AIDA (1982) la probabilité d'une surface de se comporter de façon spéculaire.

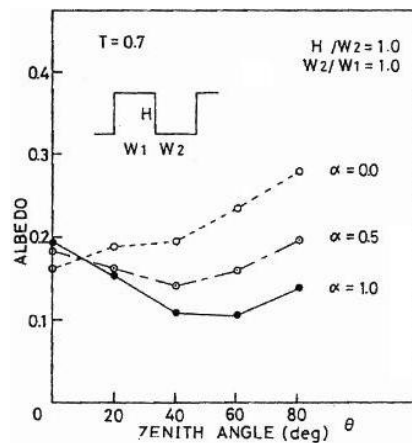


Figure 10 : La variation de l'albédo effectif en fonction de l'angle zénithal solaire, selon trois caractéristiques réfléchives de surface. AIDA (1982)

II. LE COMPORTEMENT OPTIQUE AU SEIN DE LA FORME URBAINE

“The total albedo of an urban system and therefore its ability to absorb solar radiation depend upon the albedo of the component materials and their geometrical arrangement.”¹: Cette citation met en avant l'importance de la réflectivité des matériaux et de l'agencement des formes au sein de la forme urbaine dans l'estimation de l'albédo effectif. Nous abordons ici le volet qui traite des aspects optiques des matériaux et l'agencement des surfaces élémentaire entre elles.

1. L'effet de l'orientation et de la réflectivité des surfaces

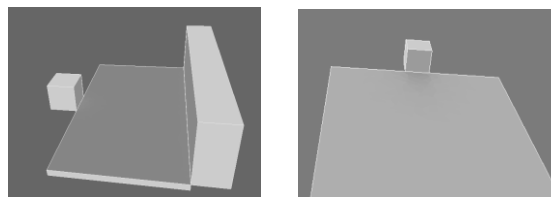


Figure 11 : La géométrie d'étude des gains solaires reçus pas la façade nord avec masque et sans masque (vis-à-vis). FLORY-CELINI et al. (2006)

L'étude menée par FLORY-CELINI et al. (2006) met l'accent sur l'effet du voisinage proche de la façade nord sur les gains solaires reçus (fig11). Les inter-réflexions sont non seulement tributaires de la distance séparant les

¹ A. SANTAMOURIS (2001), *Energy and climate in the urban built environment*.

surfaces entre elles, mais également de leurs propriétés réfléchives. Ainsi on a pu déduire qu'il existe un rapport D/H optimal (0.5) pour lequel il y a un gain maximal en hiver (15%). La contribution du sol à ce gain est d'autant plus importante que sa réflectivité est forte et la hauteur solaire est élevée (en été). Le vis-à-vis joue également un rôle important mais pour une incidence solaire faible (en hivers) fig12.

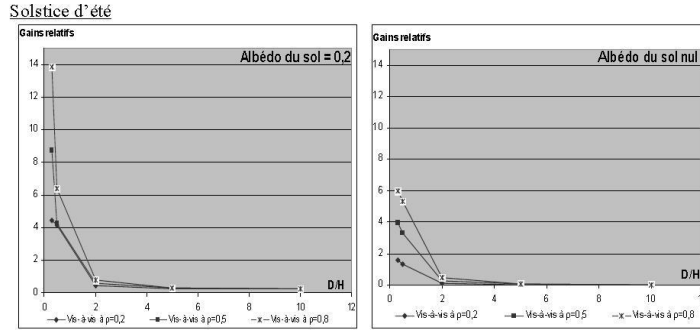


Figure 12 : La variation des gains estivaux de la façade nord en fonction de la réflectivité du sol. C. FLORY-CELINI et al (2006)

Dans un contexte plus large, au sein d'un quartier (fig.13), l'étude de **CHERQUI et al. (2005)** montre que le comportement du flux réfléchi est différent selon l'orientation des façades, la réflectivité des surfaces urbaines (toit, sol et façade) et la densité du bâti (fig.13). **CHERQUI** abouti au fait que les orientations nord bénéficient d'une proportion importante de flux réfléchi par rapport aux flux directs reçus. Ces flux peuvent constituer jusqu'à 30% de l'énergie globale incidente après les inter-réflexions (fig14), et sont d'autant plus importants que la hauteur solaire est faible.

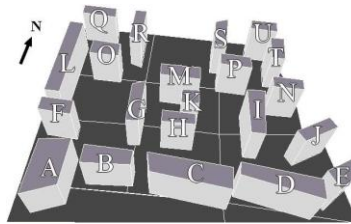


Figure 13 : Le quartier d'étude des flux réfléchis, après les inter-réflexions. **CHERQUI et al. (2005)**

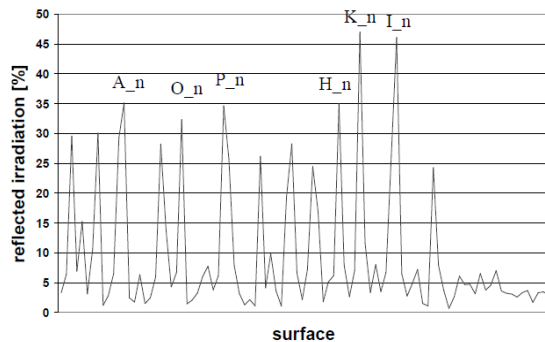


Figure 14 : La proportion du flux réfléchi par rapport au flux global incident reçu par les façades nord. **CHERQUI et al. (2005)**

On conclut également que le flux incident sur les surfaces des façades varie annuellement différemment selon l'orientation. Alors que les courbes de variation des flux incidents des façades nord et sud gardent les mêmes aspects pour tous les bâtiments, celles des façades est et ouest sont très diverses. (fig15).

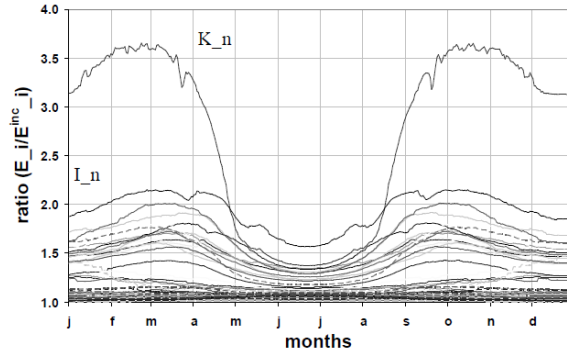


Figure 15 : La variation annuelle du rapport « flux global incident après réflexions sur le flux total avant toutes réflexions ». K_n et I_n désignent respectivement les façades nord des bâtiments K et I . CHERQUI et al. (2005)

CHERQUI conclut aussi que les inter-réflexions prédominent dans les tissus denses, là où les distances séparant les parois des murs sont courtes. Les matériaux des surfaces ne font qu'accroître ces apports. La figure 16 illustre l'influence des matériaux des façades et du sol sur les apports énergétiques reçus par les orientations sud. Ces gains sont d'autant plus importants que la hauteur solaire est élevée (Juin et Juillet) et que la réflectivité des surfaces est importante (0.7 et 0.9).

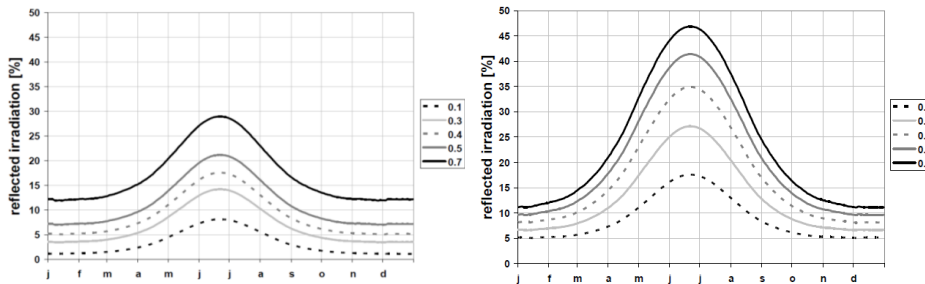


Figure 16 : La variation de la proportion du flux réfléchi reçu par les façades Sud en fonction de la réflexion des façades (à gauche) et du sol (à droite). CHERQUI et al. (2005)

3. Les contributions des surfaces urbaines à l'albédo effectif

GROLEAU (2008) dégage un certain nombre de constats moyennant le couple (densité, pourcentage de surfaces des façades¹). L'étude comparée de plusieurs cas montre qu'il faut plutôt penser en termes de flux incident sur les surfaces urbaines (sol, toits et façades) afin d'évaluer leurs contributions saisonnières à l'albédo effectif. En effet, les calculs montrent que la contribution des toits à l'albédo effectif demeure constante entre décembre et juin du fait de la constance des flux incidents. La contribution des façades diminue comme le flux incident diminue avec la hauteur solaire. Enfin, la contribution du sol augmente avec la hauteur solaire (tableaux de 1 à 3).

D30%	décembre			mars			juin		
	% surf- Ensol.	Glob- incid.	Réf-ciel	% surf- Ensol.	Glob- incid.	Réf-ciel	% surf- Ensol.	Glob- incid.	Réf-ciel
toits	33	30	38	29	30	37	28	30	37
Façades	14	20	14	12	9	8	12	5	5
sol	53	50	48	59	61	55	61	65	58
Albédo	0.360			0.367			0.368		

Tableau 1 : Les contributions des surfaces urbaines à l'albédo effectif à 11H, pour une géométrie de densité 30% et de pourcentage de surfaces de façades 20%. GROLEAU (2008).

D=30%	décembre			mars			juin		
	% surf- Ensol.	Glob- incid.	Réf- ciel	% surf- Ensol.	Glob- incid.	Réf- ciel	%surf- ensol	Glob- incid.	Réf- ciel
toits	34	30	46	26	30	47	22	30	47
Façades	44	49	38	43	35	28	37	18	19
sol	22	21	16	31	36	25	40	52	34
Albédo	0.290			0.288			0.287		

Tableau 2 : Les contributions des surfaces urbaines à l'albédo effectif à 11H, pour une géométrie de densité 30% et de pourcentage de surfaces de façades 50%. GROLEAU (2008)

D30%	décembre			mars			juin		
	%surf. ensol	Glob- incid %	Réf-ciel	% surf. ensol	Glob- incid %	Réf-ciel	% surf. ensol	Glob- incid %	Réf- ciel
toits	36	29	51	21	30	55	13	30	61
Façades	64	69	49	79	69	45	81	57	36
sol	0	2	0	0	2	1	6	13	4
Albédo	0.263			0.243			0.220		

Tableau 3 : Les contributions des surfaces urbaines à l'albédo effectif à 11H, pour une géométrie de densité 30% et de pourcentage de surfaces de façades 80%. GROLEAU (2008)

¹ Le pourcentage de surface des façades (%SF) est définie comme étant « le rapport de la surface des façades à la totalité de l'enveloppe surfacique du tissu urbain, constitué des surfaces de toits ST, de façades SF et de sol SS. ». GROLEAU (2008).

Pour ce qui est d'effet de la géométrie urbaine, on constate que les contributions des façades et des toits augmentent avec la hauteur des bâtiments (on a fait varier le %SF sans pour autant modifier la densité surfacique).

III. LE COMPORTEMENT THERMIQUE DES MATERIAUX

Les rayonnements solaires de courte longueur d'onde, une fois absorbés par les surfaces urbaines, contribuent indirectement à l'augmentation de la température de surfaces des matériaux. Les effets convectifs et radiatifs font réchauffer l'air ambiant. Les phénomènes physiques sont donc étroitement liés.

1. La température de surface des matériaux

SANTAMOURIS *et al.* (2001) étudient l'influence de l'orientation des rues sur la température de surface des matériaux de chaussée et de trottoirs. Différents points de mesure sont répartis à la surface du sol (rue), depuis les extrémités jusqu'au centre de la chaussée. Ces points sont désignés dans la figure par les lettres a, b, c, d, et e. La fluctuation des valeurs de température est manifeste à travers les courbes de tendance en fonction des heures de prise des mesures. L'expérience s'est déroulée sur deux jours (environ 40 heures séquencées par pas d'une heure). Fig.17

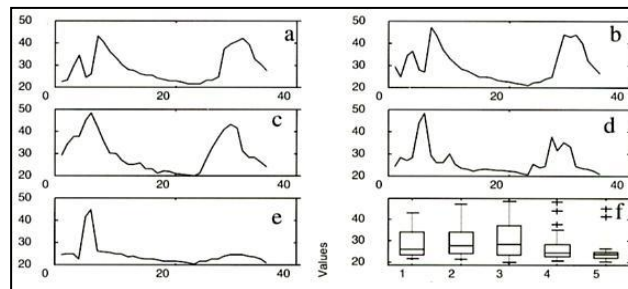


Figure 17 : Un exemple parmi les rues canyon expérimentées orientées NO/SE. Les mesures de la température de surface au niveau de 5 points de la surface du sol (a, b, c, d et e). SANTAMOURIS *et al.* (2001).

A part l'emplacement des points de mesure, les lettres de (a) à (f) correspondent à des matériaux de revêtement différents :

- (a) et (e) représentent les extrémités du canyon et correspondent à un matériau blanc du trottoir;
- (c), (d) et (d) représentent trois point de mesure répartis sur la chaussée et correspondent à l'asphalte.

- (f) regroupe les mesures de température de surface au niveau des 5 points (a, b, c, d et e) pour toute la période d'expérience (2 jours). La numérotation de 1 à 5 correspond aux cas de (a) à (e).

Certes, la température de surface est tributaire de l'exposition solaire des matériaux. Mais, si nous avons abordé cette étude c'est pour attirer l'attention sur le fait que l'orientation des rues, ou plutôt du tissu urbain, joue un rôle très important dans la contribution au réchauffement des surfaces urbaines (tab4).

Nom de la rue	H/W	Orientation en ° (relativement au Sud)	trottoir		Asphalte	
			Max DT (K)	Max peak DT (K)	Max DT (K)	Max peak DT (K)
Giannitson	0.725-1	40	20	10	27	6
Kavalas	1	50	18	14	20	6
Omirou	1.75-2.62	35	19	22	20	7
Evrota	1-1.5	65	10	7	8	3
Mavromihali	2.47	60	22	8	21	14
Kordou	2.74	55	15	10	-	-
Valaoritou	2.47	30	20	13	-	-

Tableau 4 : La mesure des écarts maximums de température (Max DT) et des pics de température (Max peak DT) des revêtements des trottoirs et de la chaussée, pour différentes orientations de rues à Athènes. SANTAMOURIS et al. (2001).

Nous pouvons déduire du tableau4 que les écarts de température des matériaux de trottoirs (Max DT) varient de 10 à 20 (K) en fonction de l'orientation de la rue. Quant aux matériaux de chaussée (l'asphalte), les écarts de températures enregistrés sont de l'ordre de 8 à 27 (K).

2. Le rayonnement thermique des façades

PAWLAK et SIEDLECKI (2003) ont étudié dans le contexte urbain de Lodz (Pologne) la température de rayonnement des façades verticales durant une période qui s'est étalée du 2 décembre2002 au 29 avril 2003 à midi. Etant d'orientations diverses et de matériaux différents, les façades émettent des rayonnements différents. L'étude ne concerne pas directement l'albédo urbain mais elle nous intéresse particulièrement en regard de l'effet de l'orientation et de l'hétérogénéité des matériaux sur le comportement des surfaces (fig18). L'étude porte sur :

- 3 façades opaques en béton : (a), (b) et (c) orientées respectivement au nord, au sud et à l'est.
- 4 façades en béton dotées de fenêtres : (d), (e), (f) et (g), orientées respectivement au nord, au sud, à l'est et à l'ouest.
- Les surfaces uniquement vitrées.

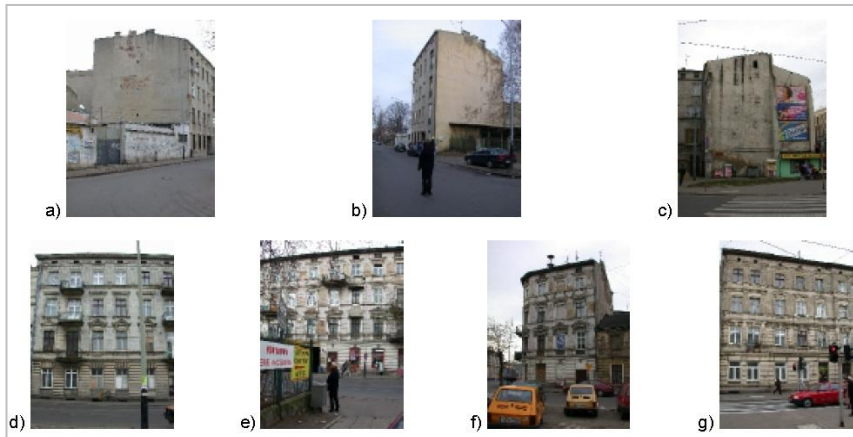


Figure 18 : Les groupes de façades utilisés pour la simulation du rayonnement thermique. PAWLAK et SIEDLECKI (2003).

a) L'effet de l'orientation des façades

Les rayonnements de grande longueur d'onde émis par les façades sud sont plus importants que ceux émis par les façades nord, malgré que le matériau de composition soit identique (béton). L'écart de température enregistré à une certaine distance des parois, peut atteindre 20°. Les orientations est et ouest ne manifestent pas d'écarts considérables (maximum 5°C), mais les mesures de température sont toujours faibles en comparaison avec les orientations sud. Enfin, le rayonnement thermique des façades nord est infime par rapport au reste des façades (fig19).

b) L'effet de l'hétérogénéité des matériaux de composition

On conclut que le béton réagit fortement avec le rayonnement solaire. Les écarts observés entre le rayonnement du béton exposé au nord et celui au sud sont notables. Quant aux surfaces vitrées, elles manifestent des écarts très faibles en fonction de l'orientation (fig19). Le phénomène est probablement dû à l'effet de compensation des écarts par les transmissions de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur des bâtiments à travers des parois transparentes (explication de l'auteur). La nature du matériau lui-même peut être aussi à l'origine de la stabilité relative des rayonnements émis par les orientations nord et sud : Le vitrage est beaucoup moins sensible à l'exposition solaire que le béton ou les métaux.

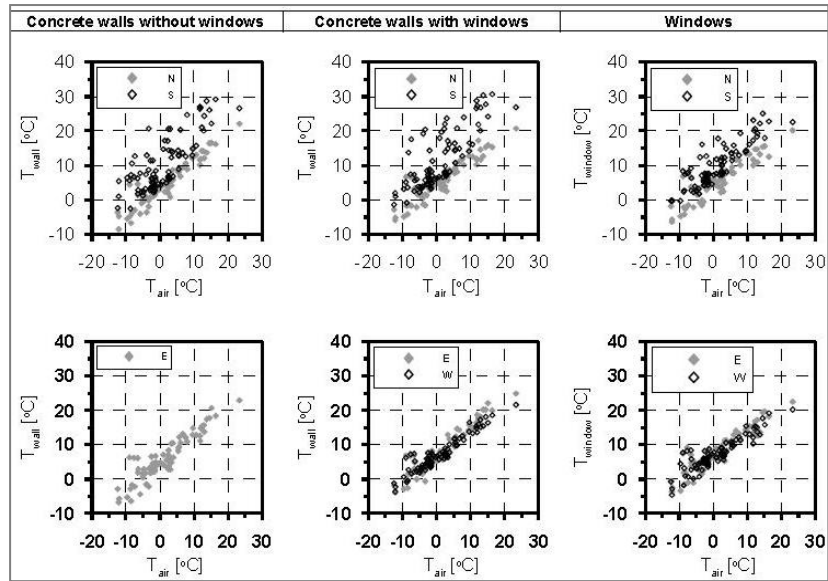


Figure 19 : La variation de la température de rayonnement des surfaces verticales en fonction de la température d'air, pour des orientations et des matériaux différents. PAWLAK et SIEDLECKI (2003).

3. La température d'air

TOUDERT (2004) calcule la variation diurne de température d'air au niveau de rues orientées canyon N-S et E-O. Quel que soit le rapport H/W (hauteur sur largeur de la rue), les écarts de température ambiante restent faibles (fig20). Mais, l'air ambiant au niveau des rues E-O a tend légèrement à être plus chaud à cause de l'intensité d'exposition solaire des façades sud, vers midi. TOUDERT n'a pas tenu compte de l'hétérogénéité des matériaux. Le chercheur a tout simplement utilisé les mêmes propriétés standards thermiques et optiques pour toutes les surfaces, ce qui peut expliquer les faibles écarts de températures enregistrés entre le canyon NS et EO

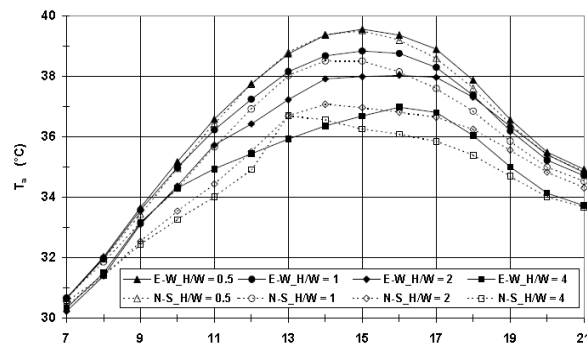


Figure 20 : La variation diurne de la température d'air T_a à 1.2 m du sol pour des rues canyon orientées N-S et E-O et pour différents ratio H/W. Latitude 32°N. TOUDERT (2004).

B. LES EFFETS DE LA MORPHOLOGIE URBAINE SUR L'ALBEDO EFFECTIF

I. L'IRREGULARITE DE LA FORME URBAINE

1. Définition

Le terme « *irrégularité* » n'est pas couramment utilisé pour caractériser la forme urbaine. Avec le développement des approches morphologiques de l'environnement urbain, ce terme devient d'usage pour désigner la rugosité ou la discontinuité d'une surface par rapport à une plateforme horizontale lisse.

2. L'effet de l'irrégularité sur l'albédo effectif

AIDA (1982) mesure pour différents modèles géométriques urbains et sous un ciel dégagé, les valeurs d'albédo effectif et d'absorption dans l'objectif d'évaluer l'effet de l'irrégularité de la forme urbaine sur l'albédo. Les modèles géométriques utilisés varient entre une plateforme horizontale « modèle 0 », deux tissus canyons orientés NS et EO désignés respectivement par « modèle1 » et « modèle2 », et une géométrie de type plot désignée par « modèle3 » (fig21).

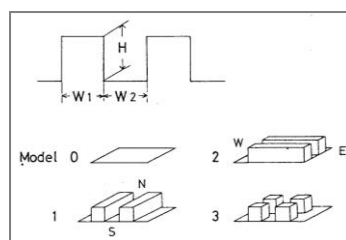


Figure 21 : Les modèles géométriques utilisés pour la mesure de l'absorption solaire. AIDA (1982).

Les mesures révèlent que l'albédo diminue avec l'augmentation de l'irrégularité de la forme urbaine. Les valeurs d'albédo du modèle « plot » sont plus faibles que ceux des modèles « canyon ». Les valeurs consignées dans le tableau 5 montrent que l'absorption des modèles 1, 2 et 3 peut dépasser de 18% celle du « modèle 0 ».

	Modèle	Dimensions		Albédo moyen	Taux d'Absorption en excès par rapport au modèle (0) de référence « flat plane » (%)
		H/W 1	W1/W 2		
0	« flat plane » : modèle aplati	0	-	0.40	-
1	modèle canyon N/S	1	1	0.29	18
2	modèle canyon E/O	1	1	0.29	18
3	« patched block model »	1	1	0.27	21

Tableau 5 : Un extrait du tableau récapitulatif de la variation de l'albédo moyen et de l'absorption en fonction de l'irrégularité de la forme urbaine. AIDA (1982).

TERJUNG (1973) constate également que les structures urbaines absorbent, dans la majorité des cas, plus de flux solaire qu'une surface bidimensionnelle car elles bénéficient d'une surface d'échange importante avec l'atmosphère: « *In conclusion, the high absorption ratios of tall buildings are mainly a result of increased surface area in the third dimension of the urban interface as compared to a two-dimensional horizontal area.* »¹

II. LES DIMENSIONS DE LA TRAME URBAINE

GROLEAU (2008) montre que le fait d'augmenter de nombre de bâtiments par unité de surface modifie l'albédo effectif de la forme urbaine. Pour une hauteur et densité données, l'albédo effectif est d'autant plus faible que le nombre de bâtiments par hectare (bat/ha) est grand. Le phénomène s'explique par le fait que le pourcentage de surface des façades² est plus élevé dans le cas d'une trame de dimension réduite (le développé de surface est plus important = un potentiel d'absorption plus fort). La figure 22 montre que pour une hauteur $H = 6\text{m}$ et en fonction de la densité:

- L'albédo effectif correspondant au tramage (10 bat/ha) est plus faible que celui correspondant au cas de (1 bat/ha).
- La plage de variation des valeurs d'albédo effectif en fonction du couple (densité, %SF) est plus grande dans le cas (10 bat/ha).

¹ TERJUNG et al., *Solar radiation and urban heat islands*.1973

² GROLEAU, *Formes urbaines et albédo urbain. Quelle relation ? Rapport fév. 2008.*

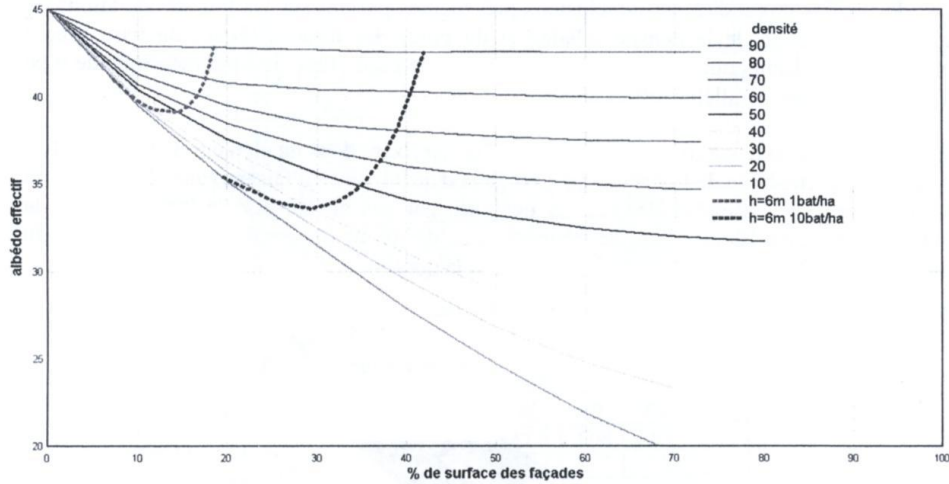


Figure 22 : La variation de l'albédo effectif en fonction du couple (densité / %SF) pour deux configurations urbaines de même hauteur ($H = 6m$) mais de tramage urbain différent, 1bat/ha et 10bat/ha. GROLEAU (2008)

III. LA HAUTEUR DE LA CANOPEE URBAINE

La hauteur de la canopée urbaine intéresse plusieurs problématiques comme celle de l'éclairage naturel des espaces extérieurs, l'étude de la température ambiante dans le milieu urbain, les études aérodynamiques (la vitesse du vent) etc. Mais la hauteur des constructions affecte aussi l'albédo effectif. La distribution de la hauteur des bâtiments peut être aléatoire ou uniforme (fig23).

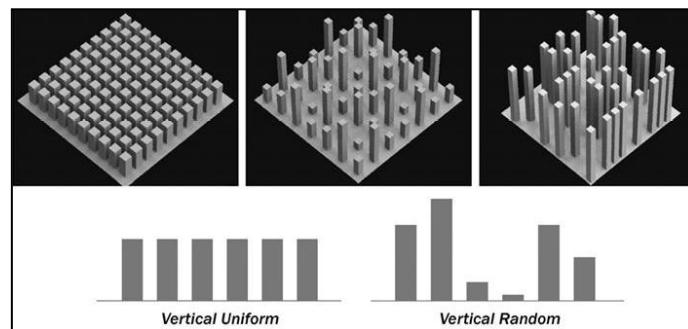


Figure 23 : Les modes de distribution de la hauteur des bâtiments dans le tissu urbain. CHENG et al. (2006).

1. La distribution uniforme de la hauteur

L'étude de l'influence de la hauteur des constructions sur l'albédo effectif a souvent été abordée sous l'angle du ratio H/W . AIDA (1982) a expérimenté trois modèles de type « plot » construits en béton, avec comme référence le « modèle3 » de dimension ($H/W=1$). Les analyses des résultats (tab6)

montre que lorsqu'on a doublé la hauteur (modèle3t : $H/W1=2$) l'albédo a baissé de 0.27 à 0.23. Dans le cas où la hauteur du modèle est réduite à moitié (modèle3f), l'albédo a augmenté (0.32). « *As the building become taller, the urban areas absorb more solar radiation* »¹.

Modèle	Dimensions		Albédo moyen	Absorption (%) : excès par rapport au modèle aplati 0
	H/W1	W1/W2		
modèle3	1	1	0.27	21
3f (flatter model)	0.5	0.5	0.32	13
3t (taller model)	2	1	0.23	27

Tableau 6 : Les moyennes de l'albédo effectif mesurées sur l'année et les taux d'absorption pour différents modèles géométriques (AIDA 1982).

KONDO (2001) calcule l'albédo effectif pour six géométries de hauteur variée moyennant un modèle numérique tridimensionnel basé sur la méthode de lancé des rayons « *photon tracking method* ». Il conclut que l'albédo diminue avec la hauteur des modèles. La figure24 illustre les tendances de variation de l'albédo effectif pour six niveaux de hauteur variant entre 5 et 50m.

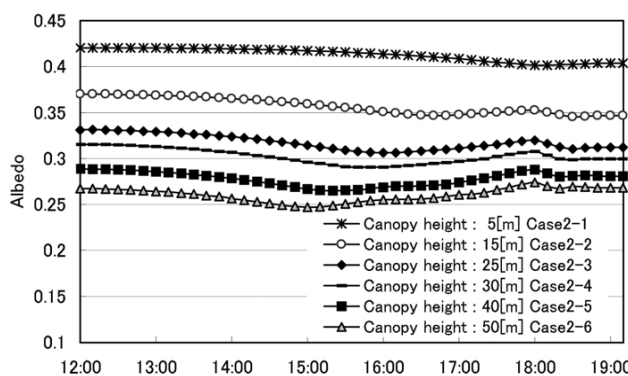


Figure 24 : La variation diurne (au mois de juin) de l'albédo effectif de six modèles de type « plot », de hauteurs différentes. La densité étant la même pour tous les cas. KONDO (2001).

2. La distribution aléatoire de la hauteur

A l'encontre de Aida qui a uniquement étudiée une distribution uniforme de la hauteur des modèles, KONDO s'en est distingué en simulant également une distribution aléatoire (fig25 et 26). Trois configurations urbaines de hauteur moyenne 25mètres ont été étudiées : La première géométrie mesure 25m de hauteur distribuée uniformément sur tout le périmètre d'étude. Les hauteurs

¹ M. AIDA (1982), *Urban albedo as a function of the urban structure. A two-dimensional numerical simulation. Part 1.*

des modèles de la deuxième géométrie sont réparties entre 15, 25 et 35m pour un pourcentage de bâti respectif de 30%, 40% et 30%. Enfin, la troisième forme compte 60% de bâtiments de hauteur 20m, 30% de 30m et 10% de 40m.

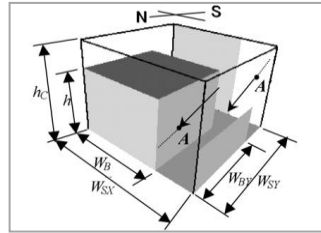


Figure 26 : Le modèle numérique utilisé pour l'estimation de l'impact de la hauteur de la canopée urbaine sur l'albédo effectif. KONDO (2001).

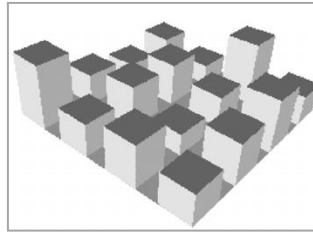


Figure 25 : Une configuration urbaine de distribution de hauteur de bâtiments non uniforme. KONDO (2001).

Les calculs montrent que l'albédo effectif est plus élevé que si l'on a moins de différence de niveau de hauteur entre les modèles. L'albédo est toujours plus important dans le cas d'une distribution uniforme de la hauteur. Le phénomène est dû au fait qu'une quantité de flux réfléchis par les toitures (ceux renvoyés par les toits de niveaux plus bas) rencontrent l'obstacle des parois verticales adjacentes : Les inter-réflexions qui se produisent contribuent à l'augmentation de l'absorption urbaine. Ce phénomène est d'autant plus lisible que les rayonnements solaires sont obliques (fig27).

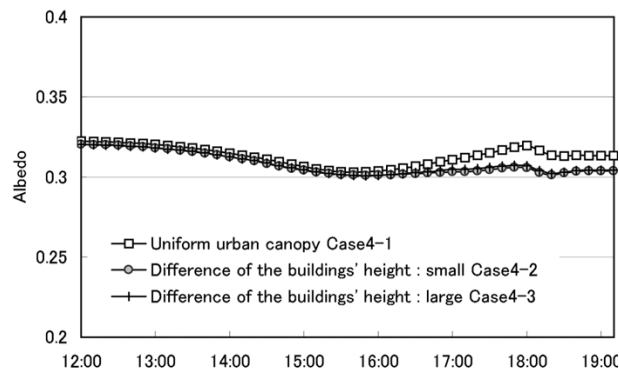


Figure 27 : La variation diurne de l'albédo effectif pour différentes distributions de hauteur de bâtiments. KONDO (2001).

IV. LA DENSITE URBAINE

La densité surfacique (%) est le rapport entre la surface hors œuvre construite et la surface totale urbaine. Cet indicateur informe sur l'emprise au sol du bâti. Il a été abordé de manière implicite par AIDA et GOTOH (1982). (KONDO 2001) l'a abordée de manière plutôt simpliste sans considérer d'autres paramètres. Enfin, GROLEAU (2008) l'a abordé en faisant varier le pourcentage de surface de façade (%SF).

1. L'approche selon le ratio W1/W2

Il faut noter que les conditions de l'expérience sont telles que l'albédo de surface est homogène, le rapport hauteur (H) sur largeur de la rue (W2) est égale à 1 et les réflexions sont considérées mi-diffuses-mi-spéculaires ($\alpha=0.5$).

Dans un premier temps, l'expérience consiste à garder la largeur des rues canyon (W2) constante et à modifier la largeur des toitures (W1) : Ainsi, on modifie la surface d'échange des parois verticales du canyon mais aussi, de manière indirecte, la densité. Il se manifeste, suite aux variations géométriques effectuées, une baisse des valeurs d'albédo d'autant plus rapide que le ratio W2/W1 est élevé (fig29). En d'autre termes, l'albédo est d'autant plus élevé que la densité est forte.

Dans un deuxième temps, deux tissus Canyon réels ont été mis à l'épreuve par le modèle numérique de simulation: Le premier est peu dense, pourvu de rues larges (W2 = 2.27) et le deuxième est de densité élevée, pourvu de rues très étroites (W2 = 0.61). Pour les mêmes conditions de simulation que l'essai précédent, l'expérience montre que l'albédo enregistré au niveau des ruelles est plus élevé que celui au niveau des grands boulevards (fig28). AIDA explique ce phénomène par le fait que la surface d'échange est moins importante au niveau du tissu dense. Il s'agit d'un cas d'étude spécifique et que le résultat ne peut être généralisé. Par conséquent, à travers cette approche de AIDA, nous ne pouvons statuer sur une loi régissant la variation de l'albédo en fonction de la densité.

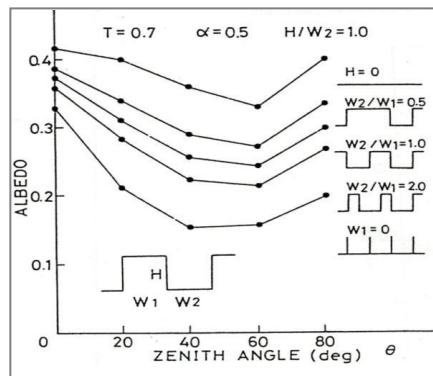


Figure 28 : L'effet du ratio W2/W1 sur la variation de l'albédo effectif en fonction de l'angle zénithal solaire. AIDA et GOTOH (1982)

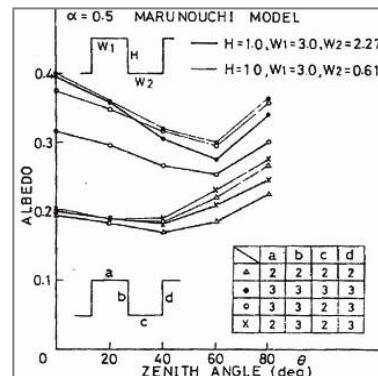


Figure 29 : Le calcul de l'albédo effectif pour deux tissus urbains de valeurs de ratio W2/W1 différents. AIDA (1982).

AIDA (1982) abouti à une loi qui dit que pour une géométrie qui respecte l'équation ($W_1 = 0.5 W_2$), l'albédo effectif est minime quel que soit l'angle zénithal solaire (fig.30). Une géométrie de largeur de rues deux fois plus grande que la largeur des toits, permet adonc des gains solaires bénéfiques durant les périodes froides. En été, AIDA recommande d'utiliser des revêtements réfléchissants en toiture et au sol afin de contrer les surchauffes.

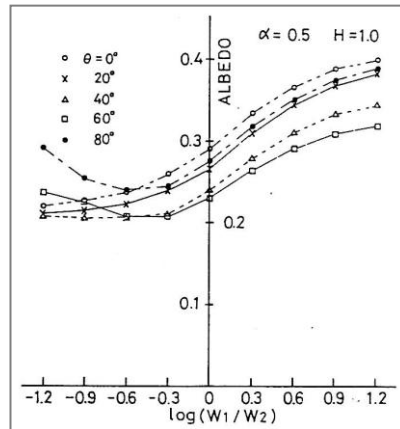


Figure 30 : La variation d'albédo en fonction du ratio W_1/W_2 pour différents angles solaires. AIDA et GOTOH (1982)

2. La difficulté d'interprétation de KONDO

Six cas ont été étudiés par KONDO (2001) pour évaluer l'effet de la densité sur la variation de l'albédo effectif. La distribution de la hauteur étant uniforme et identique pour tous les cas. Enfin, les réflexions sont considérées 100% diffuses dans le modèle de calcul utilisé. Le chevauchement des courbes de tendance (fig.31) ne permet pas de statuer sur une tendance claire de variation d'albédo en fonction de la densité. La complexité d'interprétation du phénomène est manifeste quand KONDO dit: « *Moreover, we found that the albedo value is high when building height is small, open space by roads is wide and building height is uniform. The albedo value was found to vary in a complicated manner with change in building coverage.* »¹

¹ KONDO (2001), *The influence of urban canopy configuration on urban albedo.*

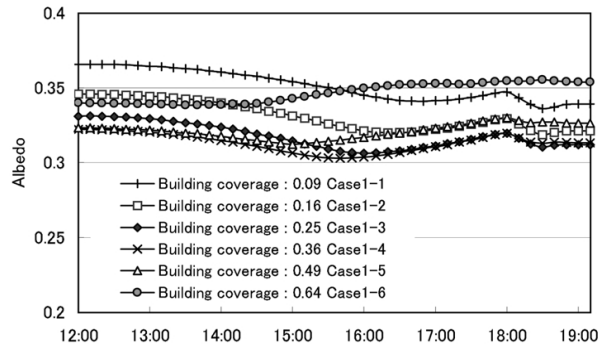


Figure 31 : La variation de l'albédo effectif de six géométries de même hauteur 25m mais de densités différentes. KONDO (2001).

3. Vers une tendance de variation de l'albédo

Le couple Densité-pourcentage de surface de façades (%SF) a permis à **GROLEAU (2008)** d'explicitier l'effet de la densité sur la variation de l'albédo effectif. Le (%SF) est défini comme étant le rapport de la surface des façades sur la totalité de l'enveloppe surfacique du tissu urbain¹ :

$$\%SF = SF / (ST + SF + SS) \text{ ou } \%SF = (SF + S \text{ territoire})$$

L'avantage de ce ratio est qu'il admet des limites finies (théoriquement de 1 à 100%) à l'encontre du ratio (H/W) ou de la hauteur (H). GROLEAU montre que, pour une hauteur donnée du tissu Plot, l'albédo effectif diminue progressivement depuis une densité supposée minimale (10%) jusqu'à une densité de 20-30%, puis remonte rapidement pour atteindre des valeurs plus élevées au niveau des densités plus fortes (fig32). L'albédo ne varie donc pas linéairement. Pour le tissu de type Canyon, l'albédo varie linéairement en fonction de la densité (fig33).

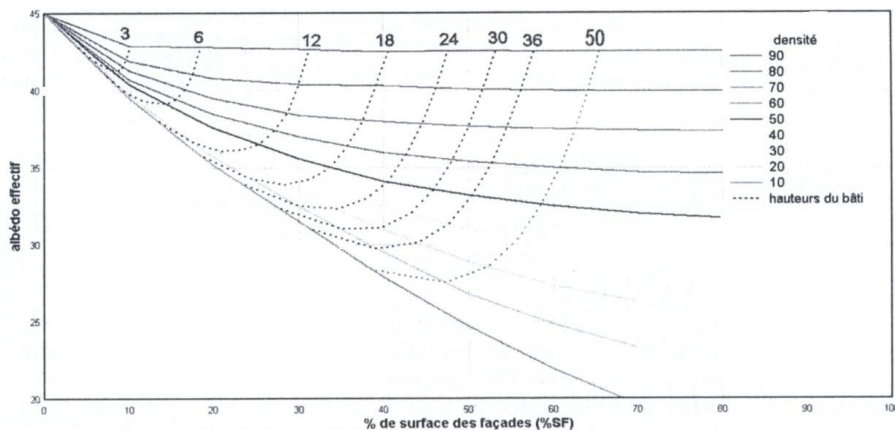


Figure 32 : La variation d'albédo effectif en fonction de la densité et du pourcentage de surface des façades (%SF), avec le tracé des courbes de hauteur. Tissu de type PLOT, 1bat/ha. GROLEAU (2008).

¹ GROLEAU(2008), Formes urbaines et albédo effectif. Quelle relation ?

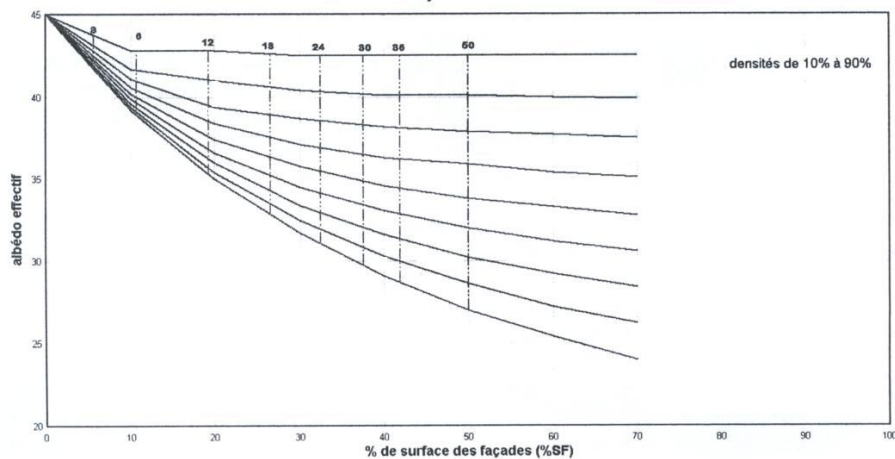


Figure 33 : La variation de l'albédo effectif en fonction du pourcentage de surface des façades, et de la densité du tissu canyon, avec le tracé des courbes de hauteur. GROLEAU (2008)

4. CONCLUSION

Les résultats d'analyse de AIDA (1982) sont obtenus dans des conditions très spécifiques : Une hauteur des modèles fixe ($H=1.0$), la transmission atmosphérique $T=0.7$, le modèle de calcul est bidimensionnel et surtout que les réflexions sont mi-diffuse, mi-spéculaires (la probabilité d'avoir du spéculaire $\alpha=0.5$). Il se trouve que l'albédo effectif augmente avec la densité urbaine lorsque la simulation a porté sur un nombre déterminé de cas. Ensuite, on a pu déduire qu'il existe un ratio $W2/W1=0.5$ pour lequel l'albédo est minime.

La différence d'approche entre AIDA, d'une part, et KONDO et GROLEAU, d'autre part, explique les différences des résultats : Les modèles de simulation utilisés par les deux derniers chercheurs ne tiennent compte que des réflexions diffuses ($\alpha=0$).

Cependant, malgré que les caractéristiques réflectives de la surface urbaine soient les mêmes, KONDO n'a pas pu statuer sur une tendance de variation de l'albédo en fonction de la densité comme l'a fait GROLEAU. Ce dernier a fait varier la hauteur des modèles et a utilisé une méthode de calcul différente. La règle de GROLEAU dit que l'albédo effectif diminue depuis une densité supposée minime jusqu'à une densité 30%, puis remonte rapidement pour les densités plus élevées.

Il faut noter qu'à travers l'approche de AIDA, nous déduisons règle qui s'apparente à celle de GROLEAU : le ratio ($W2/W1=0.5$) au niveau duquel l'albédo est minime correspond à une certaine valeur de densité faible (environ 10%), mais qui ne coïncide pas tout à fait avec celle découverte par GROLEAU.

V. LE FACTEUR DE VUE DE CIEL (SVF)

1. Définition

RATTI et al. (2003) définissent le facteur de vue de ciel en disant que c'est une mesure d'ouverture au ciel de la géométrie urbaine: « *Good measure of the openness of the urban texture to the sky, often associated, among other indicators, to the increase of temperature in the urban context compared with the surrounding rural context, referred to as the urban heat island phenomenon.* »¹

TELLER et al. (2001) le définissent sous un autre angle en disant que c'est un indicateur du degré de fermeture au ciel senti par un observateur situé dans un espace extérieur: « [...] *the perceptive confinement felt by and observer located in the open space.* »²

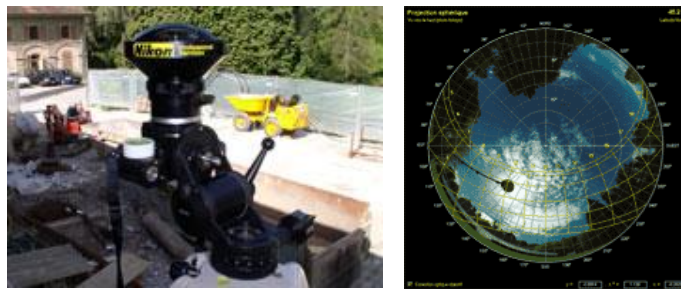


Figure 34 : Caméra de champ de vision hémisphérique (180° pour l'estimation du facteur de vue de ciel (à gauche). A droite, une image réalisée par la technique « œil du poisson ». Source : http://www.csbat.net/equipe/t03_geometrie.htm

Il existe plusieurs méthodes de calcul du facteur de vue de ciel qui diffèrent selon les approches. Nous nous contenterons d'en évoquer quelques unes. Certains chercheurs comme OKE³ ont estimé ce facteur en fonction du ratio H/W dans le cas d'une rue canyon asymétrique (bordée de deux bâtiments de hauteur différente). D'autres techniques peuvent aussi servir d'outil d'évaluation de ce facteur comme la technique de l'œil du poisson « fish eye » (fig34). Enfin, certains modèles numériques de simulation solaire comme Monte Carlo et Solène (fig35) calculent le facteur de vue de ciel moyen en utilisant d'autres formules :

¹ Ratti et al., *Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate.* 2003. Source: ATHAMENA, 2008.

² Teller et al., *Townscape II—A computer system to support solar access decision-making,* Solar Energy,, 2001. Source: ATHAMENA, 2008.

³ OKE (1981) *Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : comparison of scale model and field observations,* J. Climatol, 1 (1981). 237-254.

${}^1SVF_{MONTE\ CARLO} = \Sigma A_i F_{is} / \Sigma A_i$, avec A_i est la surface élémentaire d'une facette (i) et F_i est son facteur de vue de ciel.

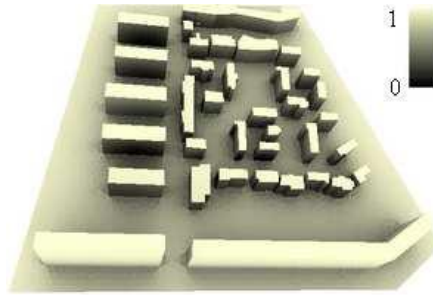


Figure 35 : Illustration du facteur de vue de ciel d'un quartier. Simulation par Solène. CHERQUI et al. (2005).

2. Le facteur de vue de ciel et la température nocturne

Le facteur de vue de ciel a été abordé pour l'étude des déperditions thermiques nocturnes par la forme urbaine. NUNEZ² a mesuré la contribution des surfaces du canyon à cette déperdition (fig36). Les résultats montrent que l'accès au ciel est important pour qu'une surface puisse évacuer les rayonnements thermiques GLO en dehors de la canopée urbaine. Le ratio H/W, qui rentre dans la formule de calcul du facteur de vue de ciel selon OKE, est lui aussi déterminant dans l'intensité de l'îlot de chaleur nocturne (fig37).

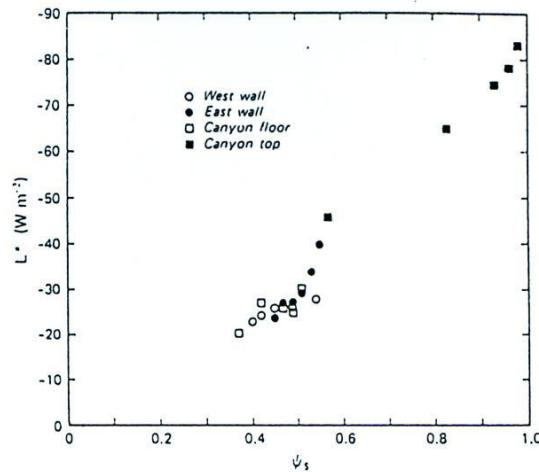


Figure 36 : Le rayonnement GLO dissipé en dehors du canyon urbain à Vancouver en fonction du facteur de vue de ciel (ψ). Les moyennes de mesures sont prises du 9 et 10 Septembre 1973, d'après NUNEZ, 1974

¹ KONDO (2001), *The influence of urban canopy configuration on urban albedo*. 2001.

² M. Nunez, 1974. Source: Oke (1981).

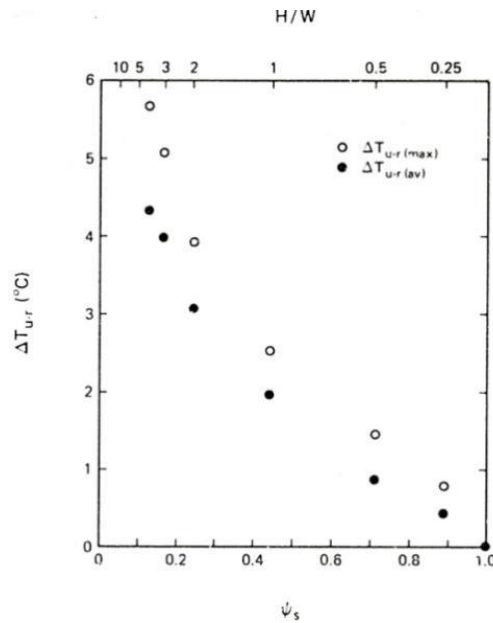


Figure 37 : L'intensité d'îlot de chaleur nocturne en fonction du facteur de vue de ciel (ψ), en corrélation avec le ratio H/W. OKE (1981).

3. Le facteur de vue de ciel et l'albédo effectif

Bien que la correspondance entre le facteur de vue de ciel et la déperdition thermique nocturne en milieu urbain soit établit de façon claire, on n'a pas pu identifier une règle générale quant à l'effet de ce facteur sur l'albédo. En effet, lors de son expérimentation de six configurations urbaines, KONDO (2001) constate que le facteur de vue de ciel diminue avec la densité urbaine mais que l'albédo effectif n'évolue pas de façon aussi linéaire. Dans le tableau 7 sont consignées les valeurs d'albédo effectif, des densités et du facteur de vue de ciel des tissus.

Les six cas d'étude KONDO	Densité (%)	Hauteur du modèle (m)	Facteur de vue de ciel moyen calculé par Monte-Carlo	Albédo effectif (%)
Cas 1-1	0.09	25	0.603	36
Cas 1-2	0.16	25	0.512	34
Cas 1-3	0.25	25	0.428	33
Cas 1-4	0.36	25	0.347	32
Cas 1-5	0.49	25	0.267	32
Cas 1-6	0.64	25	0.183	34

Tableau 7 : L'étude de variation de l'albédo effectif (au solstice d'été à midi, latitude 35°N) de six géométries en fonction de la densité et du facteur de vue de ciel. KONDO (2001).

Il ne se manifeste pas une réelle correspondance entre l'albédo effectif et le facteur de vue de ciel. Ce ci est dû très probablement au faite que ce dernier facteur est en étroite relation avec la densité urbaine qui entretien avec l'albédo un lien complexe.

VI. LA TYPOLOGIE DU TISSU URBAIN

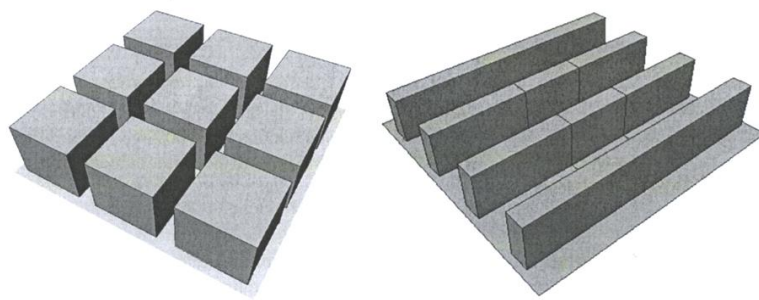


Figure 38 : Configuration PLOT et Configuration CANYON.
GROLEAU (2008)

D'après AIDA (1982)¹ le modèle type plot et celui de type canyon se comportent différemment en termes d'albédo. L'étude qui a porté sur deux géométries spécifique (largeur des toits W_1 =largeur des rues W_2 =hauteur des modèles H), ne peut être généralisée. Nous pouvons, néanmoins, constater que le tissu Plot présente un albédo moyen inférieur de 2% à celui du modèle canyon.

GROLEAU (2008), quant à lui, avance une explication plus rationnelle et qui s'applique dans toutes les circonstances, c'est-à-dire pour tous les modèles géométriques simples de type Plot et Canyon (fig38) : « Pour les densités fortes, l'effet de la forme urbaine ne se fait guère sentir ». Ceci est dû au fait que « le tissu Plot, pour les densités élevées s'apparente au tissu Canyon ». Par contre, si la densité est faible, et en présence d'une hauteur de bâtiments importante (fort % de surface de façades), les écarts deviennent importants : On aura des valeurs d'albédo plus élevées pour les modèles Canyon.

¹ AIDA (1982), *Urban albedo as a function of the urban structure- a model experiment.*

C.LES EFFETS DES FACTEURS SPATIO-TEMPORELS

I. GENERALITES

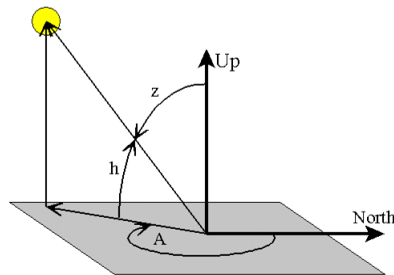


Figure 39 : L'angle zénithal, la hauteur solaire et l'azimut solaire.

Source : <http://www.srrb.noaa.gov>

1. La hauteur solaire

La hauteur solaire est l'angle, exprimé en degré, que fait le faisceau solaire principal à un instant donné par rapport à la surface horizontale du sol (fig39). Cet angle peut varier entre 0° (soleil à l'horizon) et 90° (soleil au zénith). La hauteur solaire maximale est atteinte durant le cycle diurne à midi, et plus on s'éloigne de cet horaire l'a hauteur solaire diminue. En regard des variations saisonnières de la hauteur solaire, l'angle d'incidence atteint des valeurs maximales au mois de juin (été) et des valeurs minimales durant la saison d'hiver (décembre) pour une latitude locale moyenne de 45°N .

2. L'angle azimutal ou azimut solaire

C'est l'angle que fait la projection au sol du faisceau solaire principal par rapport à la direction Nord/Sud. Il varie entre 0° à midi et 180° lorsque le soleil est en plein Nord. On peut parler d'azimut est (soleil du côté Est) ou d'azimut ouest (soleil du côté Ouest).

3. L'angle solaire zénithal

L'angle que fait le faisceau solaire principal avec le zénith. C'est l'angle complémentaire de la hauteur solaire et varie de 0° à 90° .

II. L'EFFET DE LA VARIATION DIURNE ET SAISONNIERE

1. Introduction

Quand les caractéristiques réfléchives d'une surface urbaine changent, son albédo effectif ne varie plus de la même manière en fonction de la hauteur solaire. Nous allons-nous confronter à deux résultats différents du fait de la différence d'approche. La première analyse montre que l'albédo est sensible au cycle diurne et saisonnier comme le modèle de simulation choisi et les expérimentations faites in situ prennent en considération les réflexions diffuses et spéculaires. La deuxième analyse montre que l'albédo est très peu sensible à la course solaire vu que le modèle utilisé tient compte uniquement des flux diffus. Dans les deux approches on a choisi un albédo de surface homogène. Il a fallu effectuer les calculs et les mesures dans des conditions climatologiques favorables pour l'étude de l'effet de la course solaire sur l'albédo effectif.

2. Quand la hauteur solaire influe sur l'albédo effectif

a) La tendance diurne

AIDA (1982) mène une étude expérimentale sur des blocs en béton de réflectivité 0.4, placés au niveau supérieur d'un bâtiment au Japon afin d'éviter tout obstacle aux rayonnements solaires incidents. L'expérience s'est déroulée pour une latitude 35°N et une longitude 139°E. Les mesures sont effectuées durant les deux journées du 3 décembre et 15 juin.

Les courbes de variation diurne de l'albédo effectif manifestent une sensibilité à la hauteur solaire. Que ce soit pour le modèle aplati (0), les deux modèles canyon N/S et E/O (1 et 2) ou le modèle plot (3), l'albédo effectif est minime vers midi et maximal au niveau des horaires matinales et avant le coucher (fig.40)

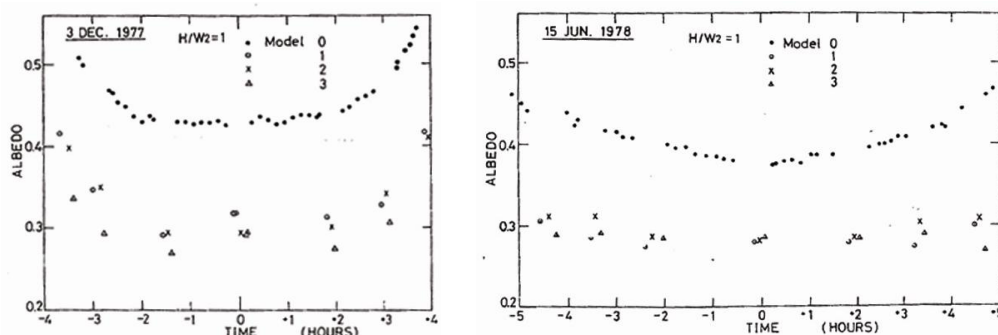


Figure 40 : La variation diurne de l'albédo effectif pour les deux journées du 3 décembre et 15 juin. AIDA (1982)

b) La tendance saisonnière

En comparant les tendances saisonnières d'albédo effectif, nous déduisons que les valeurs hivernales sont toujours les plus élevées et que les variations sont plus rapides. Durant l'été, les valeurs sont plus faibles et d'après la concavité de la courbe correspondante, les variations sont lentes.

Nous percevons mieux les divergences des valeurs saisonnières d'albédo à partir de la figure 41. Les pentes que font les nuages des points de mesure correspondants aux saisons manifestent une variation rapide des valeurs durant l'hiver : L'albédo effectif augmente rapidement avec l'angle zénithal solaire.

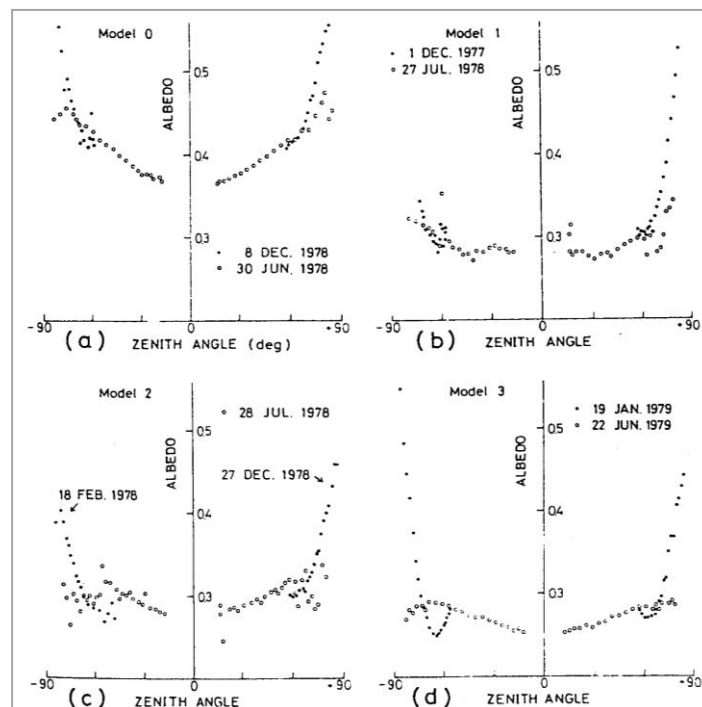


Figure 41 : La variation de l'albédo effectif en fonction de l'angle zénithal solaire. AIDA (1982).

Outre l'hiver, PAWLAK et FORTUNIAK (2003) choisissent le printemps pour le calcul de l'albédo. Les conditions d'expérimentation sont telles que les modèles d'études de type canyon NS et EO sont construits en brique rouge d'albédo de surface 0.34 et de dimensions $H = W2 = 1$ et $W1 = 0.5 W2$, avec H =hauteur du modèle, $W1$ = largeur de la rue et $W2$ =largeur des toits. Ces modèles physique sont placés au dessus du toit d'un bâtiment à une latitude $51^{\circ}46'N$ et longitude $19^{\circ} 20'E$.

Les résultats confirment les analyses précédentes. Les géométries canyon NS et EO expérimentées sous un ciel clair, manifestent le même comportement à l'égard de la hauteur solaire : L'albédo en hiver est toujours supérieur à celui du printemps. Pour une surface plane, l'espacement entre les courbes saisonnières est mieux lisible (fig.42).

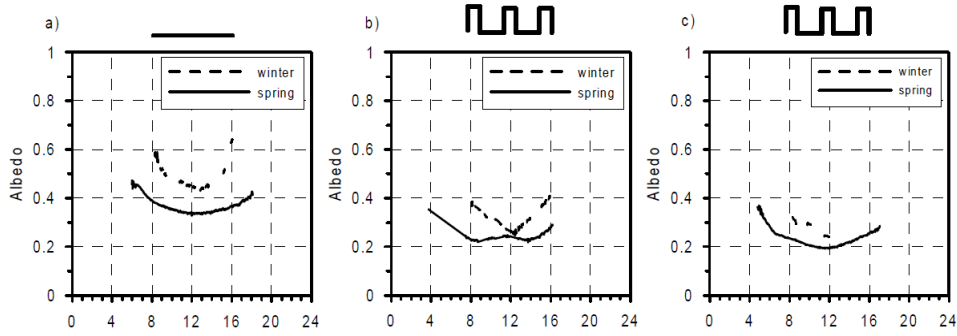


Figure 42 : La variation saisonnière de l'albédo effectif pour une surface horizontale (a), un modèle canyon NS (b) et un modèle canyon EO (c). PAWLAK

PAWLAK et FORTUNIAK utilisent, dans un deuxième temps, une version développée du modèle numérique MONTE-CARLO, une version tridimensionnelle qui module le comportement optique de la surface du matériau en fonction de l'intensité des rayonnements incidents mais aussi de l'angle d'incidence (fig.43). Nous pouvons déduire les

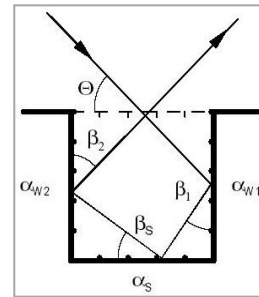


Figure 43 : La méthode de lancé des photons « photon tracking method » par le modèle MONTE CARLO. PAWLAK et FORTUNIAK (2003).

mêmes résultats de l'étude empirique précédente mais aussi un autre phénomène : Le canyon NS manifeste, aux alentours de midi, une légère hausse des valeurs d'albédo due au fait qu'au moment où l'azimut solaire est nul (soleil au sud), le faisceau solaire est majoritairement la surface horizontale du sol. Fig.44

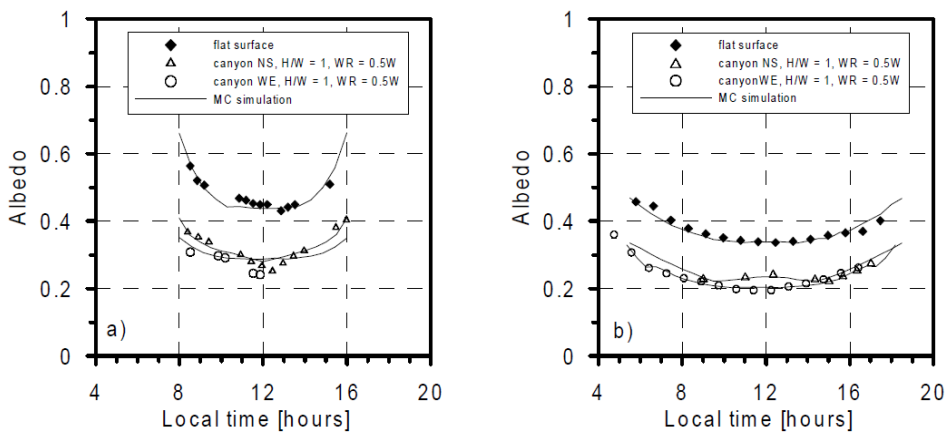


Figure 44 : La variation journalière de l'albédo effectif de différents modèles en hivers 2002/2003 et au printemps 2003, à Lodz (Pologne). PAWLAK et FORTUNIAK. (2003).

3. Quand l'albédo effectif est peu sensible à la hauteur solaire

Les simulations dans Solène ne tiennent compte que des flux diffus. Les réflexions spéculaires, elles, ne sont pas prises en compte dans le calcul. Malgré que GROLEAU utilise un albédo de surface homogène (0.45) et que les conditions radiatives soient favorables (ciel dégagé), les résultats diffèrent de ceux de PAWLAK et AIDA. En effet, les différences de calcul d'albédo en fonction de la variation saisonnière et diurne ne dépassent guère 1%, quelque soit la configuration géométrique étudiée. Dans le tableau 8 sont consignées les valeurs d'albédo saisonnières pour des configurations géométriques variées :

Densité	%SF 20			%SF 50		
	déc.	mars	juin	déc.	mars	juin
20	34.8	35.7	35.7	27.3	26.8	27.2
30	35.6	36.3	36.3	29.5	28.9	29.0
50	37.2	37.6	37.6	33.7	33.2	32.9

Tableau 8 : Les valeurs saisonnières d'albédo effectif calculées par Solène pour des configurations urbaines différentes. GROLEAU (2008)

III. L'EFFET DE L'ORIENTATION DU TISSU URBAIN

PAWLAK et FORTUNIAK (2003) considèrent que l'effet de l'orientation du tissu urbain est négligeable puisque la tendance de variation saisonnière et diurne demeure la même et les écarts sont très faibles entre les deux tissus canyons NS et EO. L'unique déviation est observée vers midi au niveau du Canyon NS, une légère hausse de l'albédo au moment où le flux solaire est parallèle à la rue Canyon.

GROLEAU (2008) avance que « Dans la mesure où l'albédo effectif ne paraît pas sensible aux effets d'orientation solaire (variation azimutale du soleil au cours de la journée), il paraît logique de penser que le changement d'orientation de la trame urbaine serait également sans grand effet sur ce même albédo. »¹. Afin de s'assurer des résultats, une étude comparative entre les valeurs d'albédo effectif de géométries Plot différemment orientées a été menée, donnant lieu au constat suivant: L'albédo n'est pas sensible à l'orientation (tab9).

¹ GROLEAU, *Formes urbaines et albédo urbain. Quelle relation ? Rapport février 2008.*

Albédo en %	%SF 20			%SF 50		
	déc.	Mars	juin	déc.	Mars	juin
Densité 20 NS	34.8	35.7	35.7	27.3	26.8	27.2
Densité 20 NE/SO	35.6	35.6	35.7	26.8	27.1	27.0
Densité 50 NS	37.2	37.6	37.6	33.7	33.2	32.9
Densité 50 NE/SO	37.4	37.6	37.6	33.5	33.2	33.0

Tableau 9 : La variation de l'albédo effectif pour des configurations plot orientées NS et NE/SO pour différentes valeurs de densité et de %SF. GROLEAU (2008).

KONDO (2001) aborde le même problème mais sous un angle différent. Il modifie à chaque fois l'orientation des rues (fig45) et trouve, malgré tout, que les configurations géométriques diverses (densité 36%, hauteur 25m et blocks de 50*50m) présentent des écarts très faibles en termes d'albédo effectif durant le mois de juin (1 à 2%) fig46.

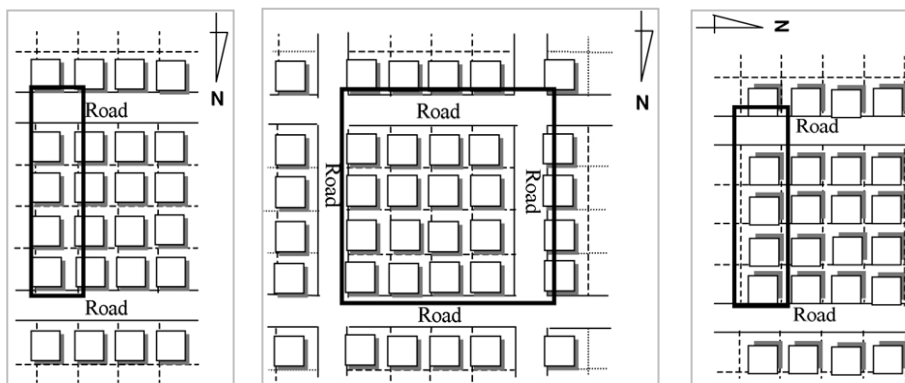


Figure 45 : Les configurations géométriques utilisées pour l'estimation de l'effet de l'orientation du tissu urbain sur l'albédo effectif. Kondo (2001).

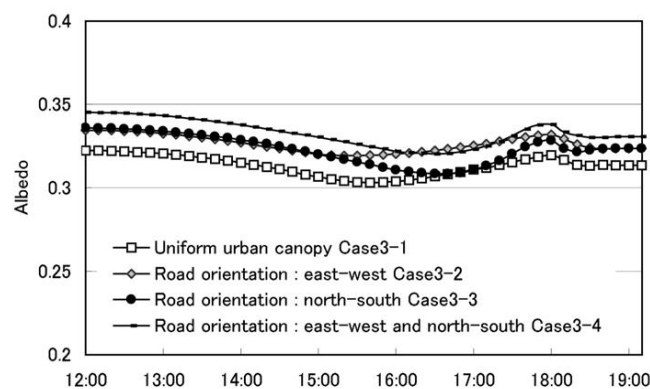


Figure 46 : La variation diurne, au mois de juin et pour une latitude 35°N, de l'albédo effectif pour différentes orientations de rue. KONDO (2001).

IV. L'INFLUENCE DE LA LATITUDE

Si l'on ne tient compte que des flux diffus dans les simulations, l'emplacement géographique au même titre que la hauteur solaire ne peut avoir d'effet sur la variation de l'albédo effectif. GROLEAU calcule pour les mêmes géométries mais en fonction de deux latitudes différentes (35°N et 45°N) l'albédo effectif au solstice d'été (juin) à midi. Les écarts ne dépassent guère 1% entre les six cas (tab10).

Les six cas	dimensions du modèle	densité	Latitude 45°	Latitude 35°
			Albédo (juin à 12H)	Albédo (juin à 12 H)
Cas 1-1	15*15	9	29	30
Cas 1-2	20*20	16	28	28
Cas1-3	25*25	25	28	28
Cas 1-4	30*30	36	29	29
Cas 1-5	35*35	49	32	31
Cas 1-6	40*40	64	35	34

Tableau 10 : Le calcul des valeurs de l'albédo effectif de six cas urbains de dimensions et densités différentes, pour deux latitudes 35° et 45°N à midi. GROLEAU (2008).

D. CONCLUSION DE L'ETAT DE L'ART

▪ *Les phénomènes optiques et thermiques*

Il existe une panoplie de matériaux urbains dont le comportement optique est fortement conditionné par la variation de l'intensité et de l'angle d'incidence solaire. Leur comportement varie donc en fonction de la variation diurne et saisonnière (SANTOS et al, 2003 ; LARSEN et LESINO, 2003 ; PIDERIT et DE HERDE, 2003 ; AIDA, 1982). Leur emploi de manière stratégique et rationnelle dans le milieu urbain peut avoir un effet sur l'albédo effectif, d'où l'intérêt d'étudier l'influence de l'hétérogénéité des matériaux dans notre travail.

Les recherches antérieures mettent aussi l'accent sur le rôle du voisinage urbain dans la modulation des flux énergétiques reçus par une surface. Les inter-réflexions prennent de l'ampleur dans certaines conditions (hauteur solaire faible, densité forte, hauteur de bâtiment élevée, matériaux réfléchissants etc.) et peuvent intéresser des surfaces plus que d'autres (comme les façades au moment où le soleil est bas...). Là aussi ce sont des informations précieuses pour entamer une réflexion sur une stratégie d'albédo effectif en fonction de la réflectivité des surfaces et du contexte urbain (densité, hauteur...). (FLORY-CELINI et al, 2006 ; SANTAMOURIS, 2001 ; CHERQUI et al, 2005 ; GROLEAU, 2008)

De part les réflexions de courte longueur d'onde, les matériaux peuvent réagir au flux solaire en fonction de l'orientation. Ces matériaux se verront leur température de surface s'élever et contribuer au réchauffement de l'air ambiant grâce aux phénomènes radiatives et convectifs. Ceci n'est pas sans conséquences sur l'îlot de chaleur urbain (SANTAMOURIS et al, 2001 ; PAWLAK et SIEDLECKI, 2003 ; TOUDERT, 2003).

▪ *Effets des facteurs morphologiques et spatio-temporels*

1. L'albédo croit avec l'irrégularité de la forme urbaine (AIDA, 1982) ;
2. L'albédo croit avec la hauteur des constructions (AIDA, 1982 ; KONDO, 2001 ; GROLEAU, 2008) ;
3. L'albédo croit avec le nombre de bâtiments par unité de surface (GROLEAU, 2008) ;
4. Effets de la densité pour un albédo de surface homogène :
 - Si les réflexions sont uniquement diffuses, l'albédo diminue depuis une densité supposée minime (10%) jusqu'à une densité 20-30%

puis remonte rapidement pour des densités plus élevées (GROLEAU, 2008).

- Si les réflexions sont mi-diffuses-mi-spéculaires (MONTE CARLO, « *photon tracking method* »), AIDA (1982) conclut que l'albédo est minime pour une géométrie urbaine qui respecte la loi sous forme du ratio $W2/W1=0.5$.
5. L'albédo effectif ne varie pas toujours linéairement avec le facteur de vue de ciel (GROLEAU, 2008 ; KONDO, 2001)
 6. L'effet de la typologie du tissu urbain sur l'albédo effectif :
 - Se fait sentir lorsque la densité est faible et le pourcentage de surfaces de façades est grand (hauteur élevée) ;
 - Est très faible si la densité du tissu est forte.
 7. L'effet de la hauteur solaire sur l'albédo effectif pour un albédo de surface homogène :
 - Se fait sentir si les caractéristiques réfléchives des matériaux de surfaces tiennent compte des réflexions diffuses et spéculaires (PAWLAK et FORTUNIAK, 2003, AIDA, 1982) ;
 - Est très faible si les réflexions considérées sont uniquement diffuses (GROLEAU, 2008)
 8. L'effet de l'orientation du tissu urbain sur l'albédo effectif pour un albédo de surface homogène est faible (GROLEAU, 2008 ; PAWLAK et FORTUNIAK, 2003 ; AIDA, 1982 ; KONDO, 2001).
 9. Pour un albédo de surface homogène et des réflexions uniquement diffuses, l'effet de la latitude sur l'albédo effectif est négligeable (GROLEAU, 2008).

PARTIE ANALYTIQUE

E.OBJECTIFS ET METHODOLOGIE D'APPROCHE

I. OBJECTIF

Le travail s'inscrit dans le cadre général des approches physico-morphologiques de l'albédo effectif. En effet, il s'agit d'étudier l'effet de la variation dimensionnelle, directionnelle, saisonnière (hauteur solaire) et matérielle (réflectivité des matériaux) de la forme urbaine sur l'albédo effectif.

Nos deux objectifs principaux consistent à :

➤ Dégager de nouvelles tendances de variation de l'albédo effectif ou, dans les meilleurs des cas, une ou des lois de variation en fonction de la combinaison de plusieurs facteurs morphologiques. Bien que les recherches antérieures aient abordé les effets de la densité et de la hauteur de la canopée urbaine, d'autres facteurs morphologiques n'ont pas fait l'objet d'étude. C'est le cas de l'inclinaison des façades des bâtiments. Ce dernier facteur peut influencer sur la variation de l'albédo effectif et contribuer au phénomène de l'îlot de chaleur urbain.

➤ Proposer une stratégie de matériaux urbains pour différentes orientations de façades, que ce soit pour le tissu de type Plot ou Canyon. Les recommandations d'attribution des matériaux seront avancées en fonction des caractéristiques saisonnières) mais aussi du contexte urbain (densité du tissu urbain, hauteur des constructions...). Pour ce faire, nous allons utiliser une méthode spécifique pour déterminer le nombre de simulations à effectuer et les combinaisons matérielles à tester. La méthode d'approche sera explicitée ultérieurement.

Grace à ces deux dernières approches, il nous sera possible d'apporter des réponses à des questionnements plus précis:

➤ Une étude comparée des formes aux parois inclinées et celles, de densité volumique équivalente aux parois verticales, permettra d'avancer des stratégies morphologiques en termes de gains énergétiques. On n'aura pas à hésiter d'opter pour l'inclinaison des façades si l'on connaît déjà à l'avance leur incidence en termes de gains énergétiques.

➤ L'étude de l'hétérogénéité des matériaux urbains nous servira pour la réévaluation de l'effet de la hauteur solaire et de l'orientation du tissu urbain sur l'albédo effectif, des facteurs n'ayant pas fait preuve d'influence pour un albédo de surface homogène.

II. LES VARIABLES MORPHOLOGIQUES

L'intérêt de la variation des facteurs morphologiques est de permettre d'évaluer leurs effets sur l'albédo effectif. L'accent sera mis sur l'étude de l'inclinaison des façades des tissus Plot et Canyon. L'approche spatiotemporelle sera utile pour l'évaluation de l'impact de l'orientation du tissu urbain et de la hauteur solaire (le cycle diurne et saisonnier). Pour ces deux dernières approches, morphologique et spatiotemporelle, nous opterons pour une réflectivité uniforme pour toute la surface urbaine de 0.45. Quant à l'étude des matériaux urbains, le but est d'en savoir le poids dans les contributions des surfaces urbaines (sol, toit et façades) à l'albédo effectif. Pour cela, des valeurs réalistes de réflectivités de matériaux seront utilisées en tant que paramètres d'entrée dans Solène.

1. La typologie du tissu urbain

Les simulations vont porter sur les deux typologies de tissu urbain Plot et Canyon. Ce sont les deux principales typologies de forme faisant l'objet d'études expérimentales (construction de modèles à échelles réduite puis mesure des phénomènes physiques), empiriques (études in situ) et numériques (simulations).

2. Les dimensions de la trame urbaine

La modélisation de la forme urbaine se fera sur un support tramé de dimension unitaire 50m x50m. Ce tramage correspond à une implantation de quatre bâtiments par hectare (4bat/ha) et s'avère plus conforme au contexte réel urbain.

3. Le nombre des façades inclinées

En fonction du nombre de façades inclinées par bâtiment, émergeront dans nos expériences les modèles suivants :

- Quatre modèles Plot ayant une à quatre façades inclinées par bâtiment et qui porteront les désignations respectives 1F, 2F, 3F et 4F ;
- Deux modèles Canyon (inclinaison unilatérale et bilatérale).

4. L'angle d'inclinaison des façades

L'angle d'inclinaison des façades varie entre 0° (parois verticales) et 25°, avec 10° et 20° comme niveaux intermédiaires. Il a été fort difficile de tester des angles d'inclinaison dépassant 25° pour maintes raisons:

- Il fallait éviter les sommets aigus et donc se conformer à la réalité urbaine.
- La nécessité de conserver toujours une surface raisonnable de toitures dans nos expériences.
- Il était indispensable d'avoir à disposition une plage de variation de hauteur de bâtiment raisonnable, au moins entre 5 et 20m.

5. La hauteur des bâtiments

La hauteur de la canopée urbaine varie uniformément et prend les valeurs suivantes : 5, 10, 15 et 20m. À cause des mêmes contraintes d'inclinaison des façades, la plage de hauteur de bâtiments a été ainsi limitée.

6. La densité surfacique

La densité correspondant à l'emprise au sol du bâti varie souvent entre 15% et 90%, généralement, par pas de 10% (15, 20, 30, 30, 40, 50, 60, 70, 80 et 90%). Nous avons pris nos précautions d'avoir des valeurs de densité faibles, moyennes et fortes, suffisamment rapprochées afin d'éviter des tendances de variations erronées dues à la linéarisation des effets.

III. LES VARIABLES SPATIO-TEMPORELLES

1. L'orientation ou l'exposition des façades inclinées

Groleau a déjà montré que, pour les configurations dotées de façades verticales et un albédo de surface homogène, l'effet de l'orientation ne se fait guère sentir. Du fait de leur parfaite symétrie, ces modèles parallélépipédiques d'orientation cardinale, ont subi une rotation suivant l'angle (45°) avant de statuer sur l'effet mineur de l'orientation sur l'albédo effectif.

L'asymétrie des modèles dont on a fait varier l'angle d'inclinaison des façades et le nombre de façades inclinées par bâtiment, nous a imposé le test de plusieurs types d'expositions :

- Quatre expositions possibles pour le modèle Plot à une seule façade inclinée.
- Deux orientations possibles pour le modèle Plot à deux façades inclinées
- Quatre expositions possibles pour le modèle Plot à trois façades inclinées.
- Deux orientations (une oblique et une cardinale) pour le modèle Plot à quatre façades inclinées.
- Quatre expositions possibles pour le modèle Canyon d'inclinaison unilatérale
- Deux orientations pour le modèle Canyon d'inclinaison bilatérale.

2. La variation saisonnière et diurne

Les périodes de simulations choisies correspondent aux trois positions solaires caractéristiques : le solstice d'hivers (le 21 Décembre), le solstice d'été (le 21 Juin) et l'équinoxe de printemps (le 21 mars), pour une latitude locale moyenne de 45°N. Pour l'étude de la variation diurne de l'albédo effectif, les plages horaires fixées pour les journées du 21/12, 21/03 et du 21/06 sont respectivement de 8-10h, 7-17h et 5-19h.

IV. LES VARIABLES PHYSIQUES

Outre les variables morphologiques et spatiotemporelles, nous affecterons aux surfaces urbaines (façades, sol et toit) des matériaux différents en termes de réflectivité. Le calcul de l'albédo effectif de chacune des combinaisons matérielles doit nous informer d'avantage sur l'effet des matériaux sur le piégeage solaire. Quels matériaux attribue-t-on aux surfaces urbaines ?

Lors des expérimentations, il est nécessaire d'opter pour des valeurs de réflectivité réalistes. CHERQUI (2005) utilise comme données d'entrée dans Solène des valeurs de réflectivités moyennant la base de données du centre de recherche anglais : « *Martin Center for Architectural and Urban Studies* » (1997). Nos valeurs sont, elles aussi, inspirées de l'étude de CHERQUI et validées après consultation de la base de données de matériaux établie par ATHAMENA (2008).

1. La réflectivité des façades

Dans le contexte réel urbain, les façades ont une réflectivité qui varie de 0.1 à 0.8, ce qui correspond respectivement à un matériau de revêtement de couleur foncé (noir) et clair (blanc). Les simulations que nous allons mener s'appuieront sur ces deux valeurs extrêmes de réflectivité avec une troisième valeur intermédiaire de 0.45. D'après la base de données de matériaux urbains établie par ATHAMENA (2008), ces dernières valeurs correspondent parfaitement aux matériaux couramment utilisés dans le revêtement de façades. Quelques matériaux sont consignés dans les tableaux 11 et 12, permettant d'apercevoir la vaste gamme de valeurs de réflectivité des façades.

MATERIAUX	ALBEDO
béton	0.1-0.35
Béton plein	0.3
bois	0.4-0.35
cuivre	0.82
aluminium	0.61-0.85
Béton neuf	0.45
Béton vieilli	0.2
Marbre blanc	0.66
Marbre sombre	0.44
Plâtre blanc	0.93
brique	0.05-0.2
inox	0.95
pierre	0.2-0.35
Béton neuf	0.45
Béton vieilli	0.2

Tableau 11 : Albédo de matériaux urbains couramment utilisés dans le revêtement de façades. Source : ATHAMENA (2008)

PEINTURE cellulosique	ALBEDO
Blanc	0.82
Jaune	0.77
Orange	0.63
Rouge vif	0.66
Rouge sombre	0.47
Gris	0.25
Vert brillant	0.21
Vert clair	0.50
Vert sombre	0.12
Bleu	0.18
Bleu foncé	0.09
Marron	0.23
Marron claire	0.22
noir	0.05

Tableau 12 : Albédo de peintures cellulosiques couramment utilisés au niveau des façades. Source : ATHAMENA (2008)

2. La réflectivité du sol

La réflectivité du sol est comprise entre 0.05 et 0.3 correspondant respectivement à l'asphalte foncé et le béton clair. CHERQUI (2005) rajoute que la réflectivité du sol peut facilement excéder 0.3 si l'on considère les objets urbains tels que les voitures, les mobiliers urbains... Pour cette raison, nous avons opté pour les deux valeurs extrêmes de réflectivité 0.05 et 0.45, avec 0.25 comme valeur moyenne. Quelques exemples de matériaux courants de revêtement du sol sont consignés dans le tableau13, en se référant également à la base de données établie par ATHAMENA (2008).

MATERIAUX		ALBEDO
Sable humide		0.09
Bardeau d'asphalte	Noir	0.05
	Gris	0.08
	Marron foncé	0.08
	Vert	0.19
	Marron clair	0.19
	Argent	0.20
	blanc	0.21
Sable sec		0.18
Béton vieilli		0.2
Asphalte blanc		0.21
pierre		0.2-0.35
Sol nu		0.25
Herbe sèche		0.31-0.33
Gazon vert		0.33
Béton neuf		0.45
Basalte		-
Dalle en grés		-
Granit (pavé, dalle)		-

Tableau 13 : Albédo de matériaux urbains couramment utilisés dans le revêtement du sol. Source : ATHAMENA (2008)

3. La réflectivité du toit

Sachant que, dans nos simulations, la hauteur de la canopée urbaine est uniforme, la surface des toitures n'entre pas en jeu dans les inter-réflexions. Tout le flux solaire réfléchi par les toits est dirigé vers le ciel. Il suffit donc, lors de l'étude des effets de matériaux sur l'albédo, d'attribuer aux toitures une seule valeur de réflectivité de 0.3, qui peut correspondre à l'un des matériaux consignés dans le tableau14.

MATERIAUX	ALBEDO
Tuile d'argile rouge	0.33
Tuile en terre cuite	0.1-0.35
Tuile en ciment sans peinture	0.25
bois	0.4
béton	0.1-0.35

Tableau 14 : Albédo de matériaux urbains couramment utilisés au niveau des toitures. Source : ATHAMENA (2008)

V. LES CONTRIBUTIONS DES SURFACES URBAINES A L'ALBEDO EFFECTIF

Nous évaluerons les contributions des surfaces de façades, du sol et des toits, à la réflexion solaire en fonction de la morphologie urbaine. Les résultats seront consignés dans des tableaux puis traduits sous forme de graphiques de tendance, des supports d'analyse beaucoup plus lisibles et facile à interpréter que les valeurs numériques. Ces courbes vont permettre, entre autre, d'élucider la ou les causes de la variation complexe de l'albédo effectif fonction de la densité.

VI. LES EFFETS DE L'HETEROGENEITE DES MATERIAUX SUR L'ALBEDO EFFECTIF

1. Objectifs

Quel matériau attribue-t-on à chacune des quatre façades d'un bâtiment et aux facettes du sol qui leurs sont contigües ? Selon quel critères et objectifs ?

La réponse à cette question suppose que l'on ait une idée claire sur les lieux du piégeage solaire, ce qui n'est pas le cas. Il faut étudier les contributions des surfaces urbaines en fonction de leurs expositions solaires (orientation et variation de la hauteur solaire) et de la variation de certains paramètres morphologiques, notamment la densité, afin d'évaluer leurs poids dans l'absorption solaire.

Maintes recherches ont pris l'initiative d'étudier les contributions des surfaces urbaines à l'albédo effectif, d'évaluer l'effet du cycle saisonnier ou encore de l'orientation du tissu urbain sur ce dernier, sans pour autant considérer l'hétérogénéité des matériaux des surfaces du sol, des toits et des façades. On a dû faire le choix d'un matériau unique qui enveloppe toute la forme urbaine. Les résultats d'analyses antérieures sont telles que :

- L'albédo effectif ne varie pas en fonction de la hauteur solaire ;
- L'orientation du tissu (Plot et Canyon) ne présente aucun effet sur ce même albédo.

Même si l'on aurait pu statuer sur l'importance du poids de certaines surfaces urbaines dans l'absorption solaire (selon le critère de l'exposition solaire), ce serait un constat basé sur des données non conforme à la réalité urbaine. Dans les villes d'aujourd'hui, la diversité des matériaux de revêtements spécifiques aux façades, sols et toits, impose que l'on tienne compte de cette hétérogénéité dans le calcul de l'albédo effectif et l'évaluation de l'impact des facteurs de l'orientation et du cycle saisonnier. Les résultats d'analyses antérieures sont intéressants mais restent relatives à un contexte urbain très rare.

Cette partie du travail nous rappelle deux expériences déjà abordées dans la littérature : L'étude du comportement thermique des matériaux de chaussée et de trottoirs en fonction de leur exposition solaire et l'orientation de la rue (SANTAMOURIS et al. (2001), et l'expérience faite par PAWLAK et SIEDLECKI (2003) sur la différence du rayonnement thermique des façades différemment orientées.

- **Questionnement**

Quel serait l'impact de la hauteur solaire et de l'orientation du tissu urbain sur l'albédo effectif dans le cas où les surfaces urbaines sont de matériaux différents ? Quelle stratégie de matériaux peut-on avancer ?

- **Hypothèses**

Nous émettrons comme réponse hypothétique que l'albédo effectif peut fluctuer en fonction des paramètres de l'orientation et de la hauteur solaire. L'intensité des variations est très probablement tributaire du mode d'affectation des matériaux suivant l'orientation (N, S, E et O) mais aussi la nature de la surface (sol, toit, façade).

A l'issue de cette analyse, émergeraient des stratégies de matériaux qui pourraient répondre à certains besoins (lutte contre le phénomène d'îlot de chaleur, gain énergétique en hiver...).

2. La méthode d'affectation des matériaux

Les paramètres physiques à faire varier sont la réflectivité des façades d'un même bâtiment (quatre pour le tissu de type Plot et 2 pour le Canyon) et celle des facettes du sol qui leurs sont contiguës. Afin de diversifier les modèles géométriques, nous avons intégré deux variables morphologiques à savoir la densité et la hauteur de la canopée urbaine. Le tableau15 illustre un exemple d'affectation de matériaux pour le cas du tissu Plot. Le tableau

comprend trois niveaux de réflectivité pour chaque surface de façade et du sol, inspirés de données urbaines réelle (base de matériau établie par ATHAMENA, 2008). Nous expliquerons plus en détail la manière avec laquelle nous avons procédé pour déterminer les combinaisons de matériaux et fixer le nombre de cas à tester.

		<i>Réfectivité des façades</i>				<i>Réfectivité des sols</i>				<i>morphologie</i>	
		<i>fac_N</i>	<i>Faç-S</i>	<i>Faç-E</i>	<i>Faç-O</i>	<i>Sol-N</i>	<i>Sol-S</i>	<i>Sol-E</i>	<i>Sol-O</i>	<i>Hauteur</i>	<i>Densité</i>
NIV.	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	10	10
	2	0,45	0,45	0,45	0,45	0,25	0,25	0,25	0,25	20	30
	3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,45	0,45	0,45	0,45	30	50

Tableau 15 : Les valeurs de réflectivité des façades et du sol, utiles pour l'élaboration de la matrice d'expériences.

F. LA METHODOLOGIE DE SIMULATION ET D'EXPLOITATION DES RESULTATS

I. LE MASQUE

Que ce soit pour le modèle Plot ou Canyon, le masque a été modélisé de façon à éviter les effets de bords pouvant fausser les résultats, surtout quand il s'agit de densités faibles. Nous avons donc étendu le masque sur un domaine assez large comme l'a fait Groleau dans son dernier rapport (fig.47).

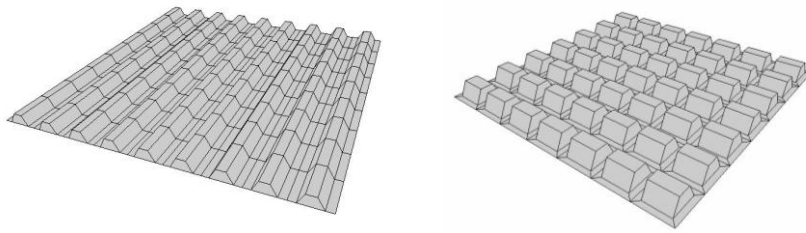


Figure 47 : Illustration de la géométrie du masque pour le tissu plot et canyon.
L'étendue du masque.

Nous tenons à rappeler que le masque a également été modélisé selon une trame de dimension élémentaire 50x50m, ce qui correspond à quatre unités construites par hectare (4bat/ha). Nous avons déjà justifié ce choix pour des raisons de conformité au contexte urbain réel. Des problèmes d'éclairage et de ventilation naturelle peuvent se poser pour des géométries de profondeur importante. L'occupation d'un terrain faisant 100x100m à raison d'une densité 70% donne un bâtiment de profondeur 70 m, alors que la trame que nous avons choisie permet de modéliser des bâtiments à moindre échelle.

II. LA ZONE DE SIMULATION¹

Groleau utilise une zone de simulation restreinte qui ne s'étend pas au-delà des façades des blocks adjacents. Nous avons essayé d'étendre la zone de simulation sur un domaine plus large en impliquant dans le calcul le voisinage plus lointain (fig.48). Il s'est avéré, d'après l'analyse comparée des valeurs issues des deux méthodes, que les écarts sont très faibles (2%). Ceci confirme que la surface d'un contour est concernée essentiellement par les flux réfléchis

¹ On choisira comme échelle de graduation, pour l'évaluation de l'intensité d'un phénomène donné ou d'un « descripteur », une graduation qui va du rouge, correspondant à une valeur extrême, au noir, correspondant à une valeur minime.

des contours à proximité. Les façades reçoivent majoritairement des flux réfléchis en provenance des façades opposées et du sol qui leur est contiguë.

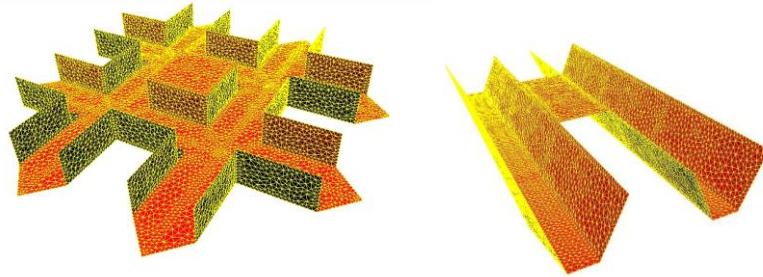


Figure 48 : Les zones de simulation correspondant au tissu plot et canyon

Il est à noter que le sol de la zone centrale de calcul a été segmenté en quatre faces adjacentes aux quatre façades. Ceci va nous permettre d'évaluer l'effet de l'orientation du sol sur l'absorption et d'avancer probablement des stratégies d'attribution des matériaux pour les trottoirs nord, sud...

III. LA ZONE D'ANALYSE

Il ne faut pas effectuer les exploitations sur toute la zone de simulation comprenant des surfaces pour lesquelles les effets d'inter-réflexions sont partiellement pris en compte. Les effets de bord auraient un impact sur les valeurs d'albédo ce qui fausserait les résultats. On doit alors trouver le moyen d'extraire les valeurs de la partie centrale de la zone de simulation, celle qui est la moins affectée par ce phénomène de bord. La zone d'analyse correspond au bâtiment central de la zone discrétisée : ses quatre façades, les quatre surfaces sols qui leurs sont contiguës et le toit (fig.49).

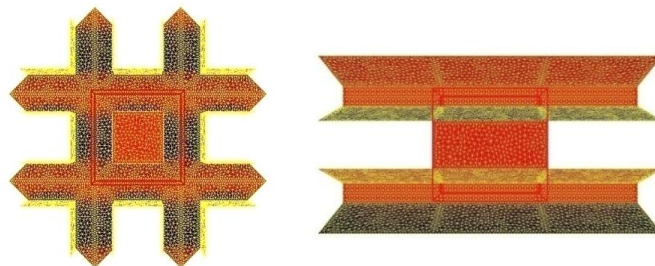


Figure 49 : Les zones centrales de calcul de l'albédo effectif correspondant au tissu plot et canyon.

Nous avons effectué un premier test, sur une géométrie plot, en faisant l'exploitation sur l'ensemble de la zone de simulation, et un deuxième en ne prenant que la zone d'analyse. Le tableau(16) illustre les divergences de calcul pour une géométrie urbaine dont on a fait varier la densité de 15% à 90% tout en gardant la hauteur des modèles fixe à 15m.

Densité	Albédo effectif	
	z-analyse	z-simulation
15%	31,0%	29,9%
20%	30,6%	29,1%
30%	31,1%	28,8%
40%	32,3%	29,2%
50%	33,9%	30,5%
60%	35,8%	32,0%
70%	37,9%	34,2%
80%	40,1%	37,7%
90%	42,5%	41,3%

Tableau 16 : Calcul de l'albédo effectif sur la zone d'analyse et celle de simulation pour une géométrie de hauteur 15m et de dimension de la trame urbaine de 4bât/ha.

Les deux courbes de tendances d'albédo urbain correspondant aux deux zones permettent d'observer deux allures différentes. Si les analyses étaient faites à partir de la zone de simulation, nous aurions plus d'absorption, notamment au niveau des densités entre 30 et 70% (fig50).

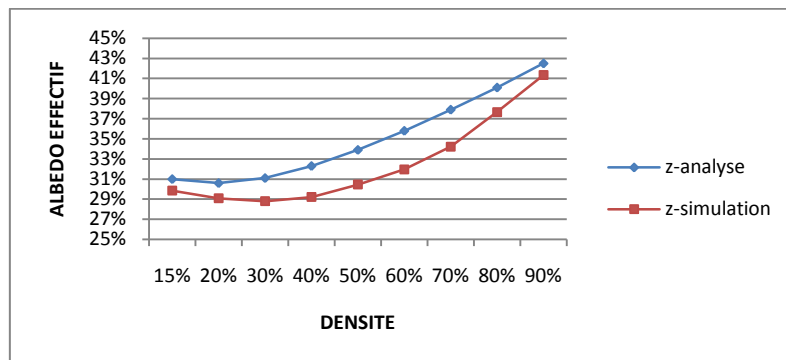


Figure 50 : La tendance de variation de l'albédo effectif en fonction de la densité. Calculs effectués sur les deux zones de simulation et d'analyse. La géométrie test étant de hauteur $H=15m$ et de façades verticales.

IV. LES PARAMETRES D'ENTREE DANS SOLENE

1. Lieu géographique

Le choix de la latitude est fixé sur $45^{\circ}N$ et la longitude sur 0° , ce qui correspond à peu près à une localisation géographique au nord de la région midi Pyrénées et au nord Est de la région d'Aquitaine. Pour donner quelques exemples de lieux correspondant à ce repère nous citons : Dordogne ($45^{\circ}02N$, $00^{\circ}36W$), Garonne ($45^{\circ}02N$, $00^{\circ}36W$) et Médoc ($44^{\circ}10N$, $0^{\circ}50W$).

2. Le ciel

Les simulations seront faites dans des conditions de ciel clair (type CIE), de 1024 faces, et ce pour limiter l'influence de la couverture nuageuse sur les calculs. Il est beaucoup plus approprié d'étudier l'albédo effectif en présence de soleil.

3. La triangulation

Il est préférable d'avoir une maille petite. Or le temps de calcul dans Solène du nombre des contours dans la scène. Pour éviter que les simulations ne soient ralenties, nous avons choisi une surface de maille élémentaire de 3m².

4. L'albédo de surface

Pour la première partie du travail, nous affecterons aux géométries un albédo de surface homogène de 0.45, car l'étude est purement de type morphologique. Ensuite, quand nous aborderons les effets des matériaux, l'albédo de surface sera hétérogène en fonction de l'orientation mais aussi de la nature de la surface (sol, façades et toits).

5. Les dates et les intervalles horaires de simulation

Comme nous l'avons déjà évoqué, trois dates seront prises en considération dans les calculs : le 21 Décembre, le 21 Mars et le 21 Juin. Par ailleurs, les calculs énergétiques s'effectueront pour les plages horaires respectives suivantes : 8h-16h, 7h-17h et 5h-19h.

V. LA MISE EN PLACE DE LA METHODE DE CALCUL DE L'ALBEDO EFFECTIF

Rappelons-nous que l'albédo effectif urbain est le rapport entre l'énergie solaire de courte longueur d'onde réfléchi vers le ciel après inter-réflexions et l'énergie globale incidente (avant les inter-réflexions). En d'autres termes, l'albédo effectif évalue le pourcentage d'absorption solaire (CLO) de la forme urbaine.

$$\text{Albédo effectif} = \frac{\text{Flux réfléchi vers le ciel par la forme urbaine } AR}{\text{Flux global incident } AM}$$

AR et AM sont des acronymes pour désigner respectivement le flux Après inter-Réflexions et le flux en tenant compte du Masque (Avec Masque).

Le calcul du flux global incident ne pose aucun problème puisqu'il s'agit du simple cumul de l'énergie solaire directe incidente sur les facettes étudiées en tenant compte du masque, et de l'énergie solaire diffuse en provenance du ciel,

après avoir défini le modèle de radiance solaire pour les dates de simulation souhaitées. Mais, qu'en est-il du calcul du réfléchi vers le ciel ?

Nous avons été confrontés à deux méthodes de calcul de ce flux énergétique, et nous avons eu à trancher si l'une ou l'autre est susceptible de nous éviter les effets de bord. Quelles sont ces deux méthodes ? Comment sommes-nous rendus compte des différences de calculs ? Quelle méthode choisir ?

1. Méthode 1 : le recours au facteur de vue de ciel

La méthode consiste à pondérer le flux réfléchi par chaque facette (compris les réflexions vers d'autres facettes de la scène) par le facteur de vue de ciel de la facette considérée, pour obtenir le flux réfléchi vers le ciel. La formule de calcul d'albédo effectif est donc la suivante :

$$\text{Albédo effectif} = \frac{\sum \Psi(i) \cdot S(i) \cdot f_{\text{ciel}}(i)}{\sum I(i)}$$

- Ψ_i en (Wh/m²) : le flux réfléchi dans la journée (après les irréflections) par un élément de contour i (il s'agit du cumul des flux horaires)
- S_i en (m²) : la surface d'un contour i
- $F_{\text{ciel},i}$: facteur de vue de ciel d'un contour (i)
- I_i en (Wh/m²) : le flux solaire incident dans la journée d'un contour i (il s'agit du cumul des flux horaire)

On considère que le flux réfléchi après, les inter-Réflexions, compris dans le domaine visible du ciel d'un contour, sera entièrement évacué en dehors de la canopée urbaine (fig.51)

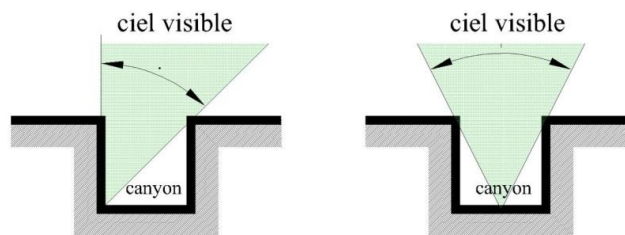


Figure 51 : A droite : vue en deux dimensions de l'angle du ciel visible par un élément de contour situé au centre de la rue canyon. A gauche : vue en 2D du domaine visible en dehors de la scène (ciel) par la façade latérale gauche du canyon.

2. Méthode 2 : le recours au descripteur « absorbée AR »

A travers cette méthode de calcul, on présume que tout ce qui n'est pas réfléchi vers le ciel par la forme urbaine est totalement absorbé. Est-ce cela est vrai ? La formule de calcul d'albédo effectif s'écrit sous la forme suivante :

$$\text{Albédo effectif} = 1 - \frac{A}{I}$$

- A = Energie solaire absorbée après les inter-réflexions
- I= Energie globale incidente (en tenant compte du masque) avant les inter-réflexions

Théoriquement, les deux évaluations de l'albédo effectif sont équivalentes. Mais, nous avons constaté des divergences de valeurs d'albédo effectif entre les deux méthodes dès les premières simulations. D'après les valeurs consignées dans le tableau 17, les écarts qui se manifestent sont d'autant plus importants que les densités sont faibles (les différences s'élèvent à plus de 6% pour les densités 15 et 20%).

Densité	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Albédo-méthode 1	31	30.6	31.1	32.3	33.9	35.8	37.9	40.1	42.5
Albédo-méthode 2	37.63	36.93	36.31	36.21	36.09	37.38	38.64	40.21	42.37

Tableau 17 : Calcul d'albédo effectif le 21/12 pour une géométrie urbaine de hauteur 15m et de façades verticales. Latitude 45°N.

Par ailleurs, les tendances de variation sont également différentes. La figure 52, illustre l'écartement des deux courbes de variation d'albédo pour les densités faibles et leur superposition presque parfaite au delà de la densité 70%. Nous avons émis l'hypothèse qu'il s'agirait d'erreurs dues à des effets de bord.

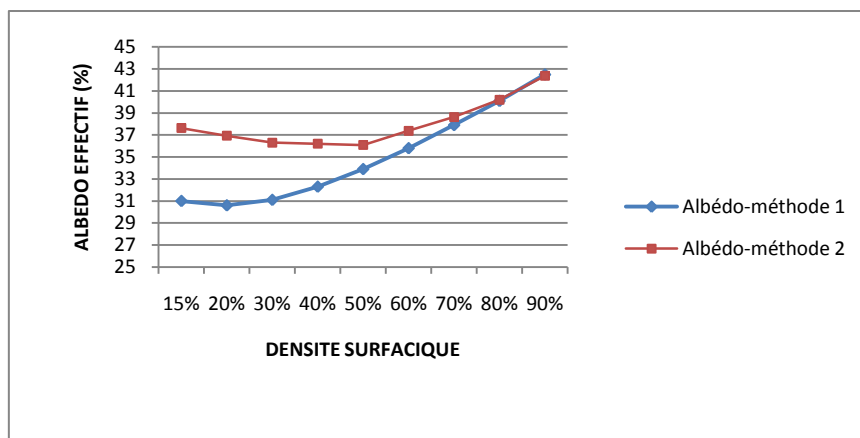


Figure 52 : La tendance de variation de l'albédo effectif selon les deux méthodes de calcul du réfléchi vers le ciel. Géométrie simulée de hauteur 15m.

3. Quelle méthode choisir ?

L'une des deux méthodes de calcul d'albédo est beaucoup plus appropriée pour éviter les effets de bord. Les erreurs qui peuvent en résulter dépassent largement un simple écart de valeurs pour donner des tendances de variation différentes. Groleau (2008) conclut que « pour une hauteur donnée, l'albédo décroît depuis la densité 10% jusqu'à une valeur minimum pour la densité 20% avant de remonter de manière assez rapide vers des valeurs élevées d'albédo quand la densité augmente »¹. La deuxième méthode, à notre plus grande surprise, montre que l'albédo décroît jusqu'à une densité de 50% (parfois 60 et 70%) avant de remonter rapidement pour des densités plus élevées.

Par ailleurs, KONDO (2001), s'appuyant dans son calcul sur la méthode qui utilise l'absorbé (methode2), trouve les mêmes valeurs et tendances que les nôtres, malgré que son modèle de simulation diffère de Solène : Le calcul effectué à midi pour une latitude 35°N, manifeste une décroissance de l'albédo effectif (de 36% à 32%) entre les densités 9% et 49%. L'albédo remonte ensuite pour atteindre 34% pour la densité $D=64\%$.

▪ 1^{er} test de vérification de la méthode 1

Nous avons effectué un test sur une géométrie simple de type canyon pour évaluer la méthode de calcul de l'albédo effectif. Le test consiste à attribuer à l'une des deux façades bordant le canyon une réflectivité de 1 (100%), le reste de la géométrie (la façade opposée + sol) étant totalement absorbant de façon à éviter les inter-réflexions (fig.53 et fig.54).

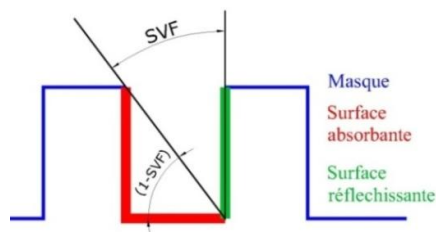


Figure 53 : Schéma en 2D montrant les deux surfaces absorbante et réfléchissante du canyon objet d'étude

- La surface réfléchissante n'absorbe rien : elle ne reçoit que du flux direct et diffus en provenance du soleil et du ciel, puis le renvoie vers ciel et les autres surfaces adjacentes.

¹ D. Groleau « Analyse de la variation de l'albédo effectif urbain en fonction de la densité construite et de la forme urbaine ». Février 2008.

- Les surfaces absorbantes, elles, reçoivent également du direct et du diffus (en provenance du soleil et de la voute céleste), mais également une quantité de flux renvoyé par la surface réfléchissante.

Nous voulons vérifier que l'énergie absorbée Après-Réflexions par les surfaces absorbantes est égale au flux global incident sur la surface absorbante en plus du flux réfléchi par la façade réfléchissante pondéré par (1 - le facteur de vue de ciel), donc le flux qui n'est pas réfléchi vers le ciel :

$$\text{Energie absorbée}_{\text{surface absorbantes (sol+façade)}} = \text{global incident}_{\text{surface absorbante}} + (1 - \text{SVF}) \times \text{flux réfléchi}_{\text{façade réfléchissante}}$$

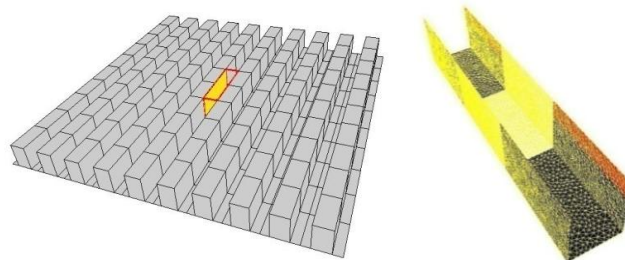


Figure 54 : Géométrie est pour la vérification de la méthode de calcul qui pondère les flux réfléchis par chaque contour par son facteur de vue de ciel, en vue d'obtenir le flux réfléchi vers le ciel par ce même contour : Illustration de la géométrie masque (canyon), de la zone de simulation qui s'étend sur 150m de longueur (avec 25m de largeur et 40m de hauteur) et de la zone de calcul de l'albédo effectif (le canyon central désigné en blanc).

Il est à noter que l'attribution de la valeur de réflectivité égale à 1 dans Solène n'a posé aucun problème, alors que pour la valeur de réflectivité nulle n'a pas été accepté dans les calculs. Nous avons dû affecter une valeur très proche de 0 (0.0001).

Le calcul donne les résultats suivants :

- Energie absorbée_{surface absorbantes (sol+façade)} = 1117432 Wh
- Global incident_{surface absorbante} = 183487 Wh
- (1 -SVF) x flux réfléchi_{façade réfléchissante} = 900723 Wh
- (1 -SVF) x flux réfléchi_{façade réfléchissante} + Global incident_{surface absorbante} = 1084210Wh≈1117432 Wh

On constate que l'énergie absorbée n'excède que de 3% la valeur cumulée du flux incident et du réfléchi pondéré par (1-SVF). Il s'agit d'un dépassement négligeable dû à la faible inter-réflexion qui a eu lieu à cause du choix de réflectivité 0.0001.

Au terme de ce calcul, nous vérifions bien l'égalité avancée en début de ce paragraphe. Donc, en prenant le SVF, nous obtenons bien l'énergie renvoyée vers le ciel

▪ **2^{ème} test de vérification de la méthode 2**

Dans SOLENE, il est possible de calculer le « Facteur-Forme-Hors-Scène ». Ce facteur évalue ce que chaque contour voit en dehors de la scène. Or, un contour, hormis la scène, ne voit pas que le ciel mais aussi les bords, surtout pour les densités faibles.

Nous avons eu l'idée de pondérer le flux réfléchi après les inter-réflexions par ce facteur hors scène et, à notre plus grande surprise, nous avons eu comme résultat la valeur complémentaire du flux absorbé Après-Réflexions pour donner le global incident :

$$(R\acute{e}fl\acute{e}chiAR \times Facteur-hors-sc\grave{e}ne) + Absorb\acute{e}AR = global Incident$$

4. CONCLUSION

La première méthode de calcul d'albédo pondère le flux réfléchi après inter-réflexions par le facteur de vue de ciel pour obtenir le flux évacué en dehors de la canopée urbaine. Nous avons bien validé par le calcul cette méthode. La deuxième méthode considère que le flux réfléchi vers le ciel n'est autre que le flux réfléchi après les inter-réflexions pondéré par le facteur hors-scène, puisque les calculs le confirment.

Entre le facteur de vue de ciel et le facteur hors scène il existe une énorme différence. Ajoutant à cette précieuse remarque que les divergences entre les deux méthodes de calcul d'albédo s'observent pour les cas de faibles densité (fig.52), nous pouvons trancher que la méthode qui utilise l'absorbé est non valide et qu'il s'agit du phénomène d'effet de bord qui rentre en jeu.

Enfin, la méthode2 qui utilise l'absorbé donne toujours des valeurs d'albédo plus élevés qu'en ayant recours à la méthode1. Ce ci confirme que l'énergie réfléchi vers les bords est comptabilisée en tant que flux évacué vers le ciel (cette perte est d'autant plus sensible pour les densités faibles). Il faut que nous reformulions notre question posée en début du paragraphe : Est ce que tout ce qui n'est pas absorbé, d'après Solène, est totalement réfléchi vers le ciel ? La réponse est non.

VI. LE RECOURS AU SCRIPT ET AUX COMMANDES SOLENE EXTERNES

Le langage de ce qu'on appelle « Script » est utilisé afin de gagner du temps lors de la simulation d'un très grand nombre de géométries. Ce langage utilise des commandes externes qui s'exécutent en dehors du logiciel Solène et donnent les mêmes résultats que si l'opération avait été lancée manuellement dans l'interface graphique du programme. Des fonctions non disponibles dans l'interface graphique peuvent aussi être lancées.

Une fois un script écrit pour faire une simulation, il est facile par la suite de le lancer pour une centaine de géométries à la fois et pour n'importe quelle date (le 21/03, 21/06 ou le 21/12). Il a fallu que nous commencions par modéliser les formes et les tester par chaque commande.

Pour le calcul de l'albédo effectif, les étapes consistent en la préparation de la géométrie à la simulation, puis pourvoir les conditions de simulations nécessaires telles que la création d'un ciel, le calcul des facteurs de forme, le facteur de vue de ciel et le facteur masque au soleil. Ensuite, viennent les étapes qui ont trait aux calculs énergétiques solaires.

1. La préparation de la géométrie urbaine

La modélisation du masque a été effectuée sous Autocad puis exportée sous format (.sat) et enregistrée sous le format (.cir) accepté par Solène. Nous faisons également l'extraction de la zone de simulation manuellement dans l'interface de Solène et enregistrons la géométrie extraite dans un fichier sous le nom de la géométrie test.

2. Assurer le contexte de simulation

- *La triangulation*

« *triangule_face* » : La triangulation est l'une des principales étapes par lesquelles il faut passer pour segmenter les surfaces urbaines en contours de surfaces très réduites. Il faut saisir comme donnée d'entrée la surface du contour souhaitée (3), une donnée qui va conditionner le temps de calcul dans la machine.

- *L'affectation de l'albédo de la surface*

« *attribue_face_val* » : L'affectation du matériau se fait normalement par cette commande mais il faut noter que plusieurs commandes ne sont pas actives et ne peuvent s'exécuter car la base de donnée n'a pas été mise à jour. Nous avons dû contourner le problème en exécutant quelques commandes pour avoir comme valeur de réflectivité de la surface urbaine (0.45).

- ***La création du ciel***

« *geode_ciel* » : c'est une commande qui assure la création du ciel avec ses propriétés telles que le nombre de facettes, alors que « *angl_solide* » effectue le calcul de l'angle solide

- ***Le calcul des facteurs forme, facteur masque et du facteur de vue de ciel***

L'ensemble de ces trois opérations bouclent la préparation du contexte dans lequel s'effectuent les calculs énergétiques. « *fraction_cie l* », « *facform* » et « *masques_sol* » sont les trois commandes nécessaires pour effectuer ces calculs. Elles exigent surtout comme données d'entrée la géométrie masque (.cir). Comme le masque au soleil change en fonction de la date, il a fallu que nous saisissons les trois dates du 21/03, 21/06 et 21/12.

3. Les calculs énergétiques

- ***Le flux global incident***

Si nous avons à faire les simulations manuellement, nous procéderions par le calcul de l'énergie solaire directe et diffuse pour les dates souhaitées, puis ferions la somme des deux pour avoir l'énergie globales incidente. Les commandes externes qui s'en chargent sont : « *energie_solaire_directe_meteo* », « *energie_solaire_diffuse_meteo* » et « *val_op_val_temps* ». le flux global incident des contours est cumulé sur toute la journée du 21/03, 21/06 et 21/12, par face : le résultat est en Wh.

- ***Les flux énergétiques après les inter-réflexions***

Afin de tenir compte des échanges après les inter-réflexions, il a fallu calculer la « *radiosité* » qui demande comme données d'entrée l'énergie globale incidente déjà calculée, l'albédo de la surface urbaine, les facteurs de forme et la surface des contours. Comme sortie nous aurons les descripteurs suivants : l'*incident_AR*, l'*absorbé_AR*, et le *réflechi_AR* (AR : après les inter-réflexions).

Le flux réfléchi vers le ciel est obtenu en pondérant le flux réfléchi_AR des contours par leurs facteurs de vue de ciel : « *val_op_val_temps* » *reflechiAR* x SVF. Ensuite nous avons fait le cumul des valeurs par face (somme des valeurs des contours d'une face).

La commande « *cumul_val_face* » exige que l'on précise quel est le critère du cumul énergétique : un cumul simple des valeurs de contours en (W/m²), ce qui n'a pas de sens, ou bien un cumul surfacique c'est-à-dire que les valeurs des contours sont pondérées par leurs surfaces (Wh) ce qui est logique.

4. Le calcul de l'albédo effectif

Ayant à disposition le flux global incident et le flux réfléchi vers le ciel, qui sont des valeurs cumulées par face et sur toute la journée (kWh), nous pouvons effectuer maintes opérations de calcul, en dehors du script, pour avoir l'albédo effectif mais également les contributions des surfaces urbaines (toits, façades et sol). Nous consignons dans un fichier Excel, parmi ces dernières valeurs de sortie, uniquement celles correspondant à la zone centrale d'analyse : Connaissant les numéros de faces des différentes facettes de sol et des façades (accessibles à partir de l'interface graphique de Solène ou par d'autres moyens tels que le sens de la normale aux surfaces...), il est possible d'enregistrer l'énergie globale incidente et celle réfléchi vers le ciel correspondant à chaque façade et facette de sol de la forme centrale d'analyse.

VII. LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

1. Introduction

L'ingénieur japonais Genichi TAGUCHI est à l'origine de cette approche qui s'avère très utile dans plusieurs secteurs et surtout dans les domaines technologiques qui ont trait à l'industrie pharmaceutique, électronique...Il a facilité l'accès aux industriels à cet outil de perfectionnement des produits en élaborant des matrices standards, des graphes et des tables. De cette façon, cette méthode a pu conquérir maints domaines et être connue dans plusieurs pays dont la France.

Une des phrases couramment employée dans les discours de ceux qui profitent de cette approche et qui a attiré notre attention est celle qui présente la méthode comme moyen de minimiser les effets nuisibles sur un produit quelconque, plutôt que d'y remédier définitivement. La méthode tient compte de la majorité ou bien tous les facteurs susceptibles de causer des ennuis, calcule leurs effets et tente de proposer des améliorations sur le produit final. Celui-ci peut être un produit architectural. C'est une méthode préventive qui, plutôt de s'attaquer aux facteurs nuisibles afin de les éliminer, fait de sorte que ces effets s'estompent en apportant des solutions ou en évitant certaines combinaisons de facteurs...

La figure55 montre un exemple de produit dont on peut maîtriser certains facteurs qui rentrent en jeu dans son processus de fabrication « facteurs contrôlables ». Après expérimentation et connaissance des conditions défavorables à la production en question, nous n'avons qu'à pourvoir des conditions meilleures et donc une bonne combinaison de facteurs influents.

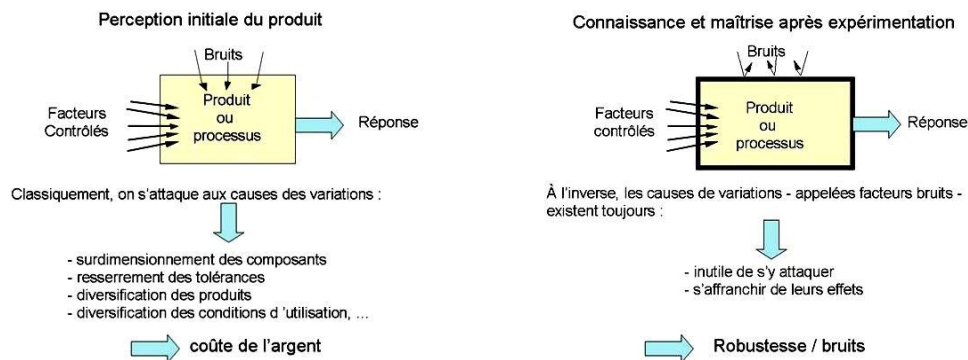


Figure 55 : Promouvoir le mode de fabrication d'un produit. Etude des facteurs à contrôler. Source : <http://plan-experiences-alexis.com>

2. Le choix de la matrice d'expériences

a) Les facteurs et les niveaux ou modalités

La méthode consiste à définir au départ les facteurs dont nous souhaitons mesurer l'effet sur le produit qui est dans notre situation la forme urbaine. Ces facteurs peuvent varier et toucher la morphologie (variables dimensionnelles et directionnelles) du tissu urbain mais aussi les propriétés physiques des matériaux de surfaces (la réflectivité).

Il faut noter aussi que chaque facteur peut acquérir plusieurs niveaux qu'on appelle aussi modalités. Nous pouvons fixer une plage de valeurs pour un facteur donné puis les organiser du niveau 1 jusqu'au niveau n : Exemple, pour la hauteur des constructions, nous pouvons disposer des niveaux suivants : 5, 10, 20, 30,100m. De même pour le facteur « densité » : 10%, 20%, 30%...90% etc.

Le nombre de facteurs et des niveaux de chacun choisis vont nous être utile pour constituer ce qu'on appelle la « matrice d'expérience ». Comme son nom l'indique, cette matrice intègre toutes ces variables (facteurs et niveaux) mais en les combinant de façon spécifique donnant un certains nombre d'essais différents les uns des autres. Comment faire le choix de la matrice appropriée ?

b) Une matrice simple

C'est en fonction du nombre des facteurs et des niveaux que l'on peut choisir la matrice qui s'adapte à notre situation et avoir une idée précise sur le nombre d'expériences (simulations) à effectuer. Mais il faut toutefois être prudent lors du choix de ces variables, car le nombre de matrices standards disponibles, dressées par TAGUCHI ou développées par d'autres, est très limité. Nous pouvons disposer de matrices qui intègrent jusqu'à 13 facteurs

par exemple, mais qui ne considèrent qu'un nombre limité de niveaux (entre 2 et 6). C'est une contrainte à laquelle nous devons nous confronter. Dans le tableau 18 sont consignés les facteurs pouvant influencer sur la forme architecturale en termes d'albédo effectif, ainsi que les différents niveaux de chacun :

		H : hauteur (m)	D : densité (%)	I : Inclinaison (°)	N : Nombre de façades inclinées
NIVEAUX	1	5	15	0	1
	2	10	20	10	2
	3	15	30	20	3
	4	20	50	25	4

Tableau 18 : Exemple de facteurs à faire varier ainsi que leurs niveaux ou modalités pour l'élaboration d'une matrice d'expériences simple.

La matrice correspondant à ce choix de nombre de facteurs avec leurs niveaux est dénommée $L_{16} 4^5$ (matrice de cinq facteurs à quatre niveaux avec 16 essais). Cette matrice est adaptable malgré qu'elle possède un facteur en plus (fig.56): Nous pouvons nous contenter des quatre premières colonnes pour établir notre propre matrice. La première colonne à gauche présente les essais ou les expériences à faire. Les lettres de A à E, en dessus du tableau, correspondent aux facteurs. Enfin, chaque ligne correspond à une combinaison de niveaux de facteurs donnant lieu, chaque fois, à un cas spécifique.

		1	2	3	4	5
N° essai	Facteurs contrôlés					
	A	B	C	D	E	
1	1	1	1	1	1	
2	1	2	2	2	2	
3	1	3	3	3	3	
4	1	4	4	4	4	
5	2	1	2	3	4	
6	2	2	1	4	3	
7	2	3	4	1	2	
8	2	4	3	2	1	
9	3	1	3	4	2	
10	3	2	4	3	1	
11	3	3	1	2	4	
12	3	4	2	1	3	
13	4	1	4	2	3	
14	4	2	3	1	4	
15	4	3	2	4	1	
16	4	4	1	3	2	

Figure 56 : Matrice de cinq facteurs à quatre niveaux. Source : <http://plan-experiences->

c) Une matrice avec des interactions

Les interactions entre les facteurs peuvent être prises en considération dans les calculs. Ainsi, les facteurs peuvent être pris deux à deux tel un seul facteur dans la matrice.

d) Les avantages de la méthode des plans d'expériences

A l'aide du même nombre de facteur et niveaux choisis, si l'on procède à des simulations classiques nous aurons un nombre excessif de cas à tester : $4^4=256$ cas de simulation nous seront imposés par la méthode classique pour l'évaluation des effets des facteurs. Il s'agira d'une étude très complète mais très lourde. La méthode des plans d'expérience permet alors de nous épargner un grand nombre de simulations et de gagner surtout du temps.

3. Le calcul des effets moyens des facteurs

La mesure de ce qu'on appelle « effet d'un facteur » suppose que l'on ait un résultat à calculer, la « réponse » de la matrice. Nous pouvons calculer autant de réponses que nous voulons et évaluer, par la suite, l'influence des facteurs sur ces réponses. Dans notre travail nous choisissons le calcul de l'albédo effectif et les contributions des surfaces urbaines à l'absorption urbaine.

a) La méthode de calcul

Ayant entre les mains les combinaisons de cas à tester et les réponses (albédo effectif à titre d'exemple), nous pouvons procéder à l'évaluation de l'effet d'un facteur donné lorsque celui ci prend chacune des modalités qui lui sont attribuées. Par exemple, le calcul de l'effet de la variation de la hauteur des constructions est fait à partir de la moyennes des réponses pour chaque niveau de H ($h_1=5m$, $h_2=10m$, $h_3=15m$ et $h_4=20m$) :

$$\text{Effet de H1 (5m)} = \frac{R_1+R_2+R_3+R_4}{4} ; \text{ où } R_1, R_2, R_3 \text{ et } R_4 \text{ sont les réponses (albédo) calculées pour les cas de niveau de hauteur H=5m.}$$

Cette opération se répète autant de fois qu'il y en a de niveaux pour chaque facteur. Ici, dans notre exemple, nous mesurerons l'effet moyen de H1, H2, H3 et H4 afin de passer à l'étape suivante : le tracé des graphes des effets.

b) Les graphes des effets moyens

Après la mesure de tous les effets des facteurs, il est possible de traduire graphiquement sous forme de courbes ou de nuages de points les valeurs numériques obtenues. Nous aurons enfin des tendances de variation de la réponse qui peuvent être aussi bien linéaires que complexes (fig.57). Nous aurons également la possibilité d'effectuer des analyses comparées entre les facteurs : poids des facteurs sur la dite réponse grâce aux aspects des courbes de tendances :

- Une variation complexe de la réponse se manifesterait par une déviation des valeurs à partir d'un certain niveau de facteur
- Une variation linéaire avec une pente douce est signe d'une faible influence sur la réponse
- Une pente forte est signe de forte influence
- Un segment de droite quasi horizontale indique que la réponse n'est guère sensible à la variation du facteur étudié.

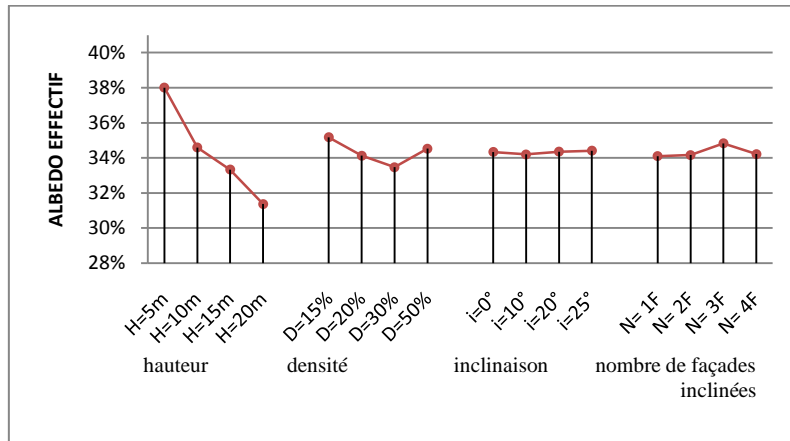


Figure 57 : Exemple d'un graphique illustrant les effets des facteurs : «densité, hauteur, inclinaison et nombre de façades inclinées sur la variation de l'albédo effectif.

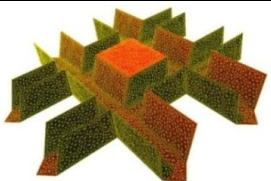


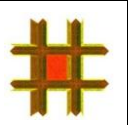

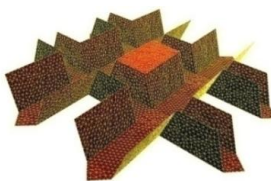
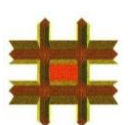

G. L'ANALYSE DU TISSU DE TYPE PLOT

I. L'EFFET DE L'ORIENTATION DE LA FORME URBAINE

Nous avons éprouvé le besoin de mesurer l'effet de l'orientation du tissu Plot sur l'albédo effectif pour des configurations urbaines autre que celles testées par GROLEAU, KONDO, AIDA et PAWLAK. Dans le tableau19 figurent les valeurs d'albédo effectif calculées le 21/12 à partir de simulations de formes urbaines de hauteur, de densité et d'angle d'inclinaison de façades fixés à l'avance (H=20m, D=60% et I=20°). Ces géométries diffèrent de point de vue nombre de façades inclinées par bâtiment, un facteur en fonction duquel nous avons dû faire subir aux tissus une ou plusieurs rotations.

Quand le nombre de façades affectées par l'inclinaison est impair (1 et 3) nous effectuons quatre rotations de tissu à 90° de manière à ce que la façade inclinée soit exposée au Nord, Sud, Est et Ouest. Si le nombre est pair (2 ou 4), nous positionnons le tissu urbain de façon à faire bénéficier, également, les façades inclinées d'expositions différentes : Les deux parois obliques du modèle 2F seront exposées simultanément, dans un premier lieu, au nord et au sud, puis à l'Est et à l'Ouest. Le modèle pyramidal d'orientation cardinale subira une rotation à 45°.

Nous constatons que l'albédo effectif demeure insensible à la variation de l'orientation du tissu urbain et de l'exposition des façades inclinées. Les écarts entre les valeurs ne dépassent guère 1% dans tous les cas.

N=1F (Une façade inclinée)	<i>Exposition au nord</i>	<i>Exposition au sud</i>	<i>Exposition à l'Est</i>	<i>Exposition à l'Ouest</i>
				
	32.56%	33.46%	32.74%	32.74%
N=2F (Deux façades inclinées)	<i>Exposition au Nord et au Sud</i>		<i>Exposition à l'Est et à l'Ouest</i>	
				
	32.36%		31.77%	






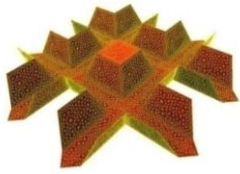

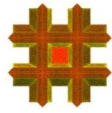
N=3F (Trois façades inclinées)	<i>Sud, Est et Ouest</i>	<i>Nord, Est et Ouest</i>	<i>Nord, Sud et Est</i>	<i>Nord, Sud et Ouest</i>
				
	31.13%	31.90%	31.79%	31.79%
N=4F (Quatre façades inclinées)	<i>Orientation cardinale</i>		<i>Orientation oblique</i>	
				
	31.46%		31.45%	

Tableau 19 : Calcul de l'albédo effectif le 21/12 pour différents modèles géométrique de type plot, en fonction de l'orientation. La densité étant de 60%, la hauteur de 20m et l'angle d'inclinaison est de 20°.

II. L'EFFET DE LA VARIATION DIMENSIONNELLE DE LA FORME URBAINE

1. La matrice d'expériences

a) Les facteurs

Nous allons focaliser notre intérêt sur l'étude de l'effet de l'inclinaison des façades sur l'albédo effectif, sans pour autant négliger les autres paramètres morphologiques. Il nous faut donc tenir compte des éventuelles interactions entre les facteurs. Pour cela, la matrice d'expérience à laquelle nous allons faire appel doit intégrer l'ensemble des facteurs suivants : l'inclinaison (I), la hauteur (H), la densité (D) ainsi que le nombre (N) des façades inclinées par bâtiment. Nous disposons actuellement de quatre facteurs dont nous évaluerons l'effet sur l'albédo effectif. Qu'en est-il du nombre de modalités ou de niveaux de chaque facteur ?

b) Les niveaux ou modalités : les contraintes

Comme nous l'avons déjà avancé, le choix de valeurs d'angles d'inclinaison va conditionner la plage de hauteur des bâtiments. On ne peut atteindre des valeurs de hauteur très élevées avec un tramage urbain qui fait 50*50m et des valeurs d'angle d'inclinaison comprises entre 0° et 25°. La figure 58 illustre un exemple de géométrie de surface de toitures très réduite. Le modèle a été construit à partir des données suivantes : densité de 15%, hauteur de 20m et l'angle d'inclinaison de 25°.

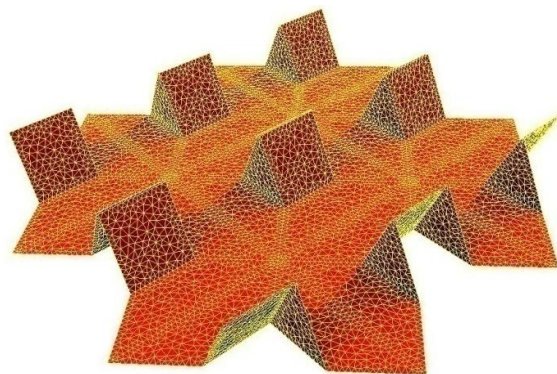


Figure 58 : Un exemple de modèle de type plot illustrant les contraintes d'inclinaison des façades (inclinaison affichée étant de 25°, la densité est de 15% et la hauteur est de 20m.

Finalement, nous avons fixé comme plage de variation d'angle d'inclinaison les niveaux 0°, 10°, 20° et 25°. La hauteur H des bâtiments sera comprise entre 5m et 20m. Quant à la densité, nous avons intérêt à considérer une large gamme de valeurs comprenant des densités faibles, moyennes et fortes. Enfin, comme le nombre de matrices standards est très limité et que nous ne disposons que de matrices ayant un nombre très limité de niveaux (maximum 5), nous feront appel à deux matrices d'expériences indépendantes mais complémentaires afin de répartir les niveaux de densité: La première matrice comprend les valeurs de densité 15, 20, 30 et 50%. Quant à la deuxième matrice, elle intégrera les mêmes niveaux de facteurs H, I et N mais avec des niveaux de densité 50, 60, 70 et 80% (tableau20).

M1		H : hauteur (m)	D : densité (%)	I : Inclinaison (°)	N : Nombre de façades inclinées
NIVEAUX	1	5	15	0	1
	2	10	20	10	2
	3	15	30	20	3
	4	20	50	25	4

M2		H : hauteur (m)	D : densité (%)	I : Inclinaison (°)	N : Nombre de façades inclinées
NIVEAUX	1	5	50	0	1
	2	10	60	10	2
	3	15	70	20	3
	4	20	80	25	4

Tableau 20 : Tableau des facteurs et des niveaux des deux matrices M1 et M2, utilisées pour l'étude de l'effet de la morphologie urbaine sur l'albédo effectif.

c) Les combinaisons géométriques

Le choix de la matrice d'expériences va non seulement déterminer le nombre d'essais mais aussi les combinaisons géométriques à simuler. Ce choix dépend du nombre de facteurs et des modalités de chacun. Dans le cas présent nous ferons appel à la matrice L_{16} de quatre facteurs à quatre niveaux (voir annexe1). Les deux matrices M1 et M2 établies sont présentées dans le tableau21, elles nous serviront de base pour l'évaluation des effets des facteurs pour deux plages de densité différentes.

MATRICE 1	FACTEURS			
N° d'essai	H (m)	D (%)	I (°)	N
1	5	15	0	1
2	5	20	10	2
3	5	30	20	3
4	5	50	25	4
5	10	15	10	3
6	10	20	0	4
7	10	30	25	1
8	10	50	20	2
9	15	15	20	4
10	15	20	25	3
11	15	30	0	2
12	15	50	10	1
13	20	15	25	2
14	20	20	20	1
15	20	30	10	4
16	20	50	0	3

MATRICE 2	FACTEURS			
N° d'essai	H (m)	D (%)	I (°)	N
1	5	50	0	1
2	5	60	10	2
3	5	70	20	3
4	5	80	25	4
5	10	50	10	3
6	10	60	0	4
7	10	70	25	1
8	10	80	20	2
9	15	50	20	4
10	15	60	25	3
11	15	70	0	2
12	15	80	10	1
13	20	50	25	2
14	20	60	20	1
15	20	70	10	4
16	20	80	0	3

Tableau 21 : A gauche, la matrice qui intègre les quatre premiers niveaux de densité 15, 20, 30 et 50%. A droite, celle qui intègre le reste des niveaux de densité (50, 60, 70 et 80%).

d) Le calcul des réponses : l'albédo effectif

Les réponses sont des valeurs d'albédo effectif pour les trois dates de simulation (21Décembre, 21Mars et 21Juin). Dans le tableau22 sont consignés tous les résultats. La moyenne de réponses des seize cas, dénommée « Effet global », est également calculée pour chaque date.

MATRICE 1	REPONSE : albédo effectif		
D [15%,50%]	Déc.	mars	juin
cas1	37,73%	38,35%	38,50%
cas2	37,42%	37,99%	38,09%
cas3	37,32%	37,74%	37,77%
cas4	37,48%	37,68%	37,66%
cas5	34,43%	35,13%	35,29%
cas6	33,42%	34,15%	34,38%
cas7	34,07%	34,20%	34,16%
cas8	34,90%	34,64%	34,52%
cas9	33,95%	34,51%	34,67%
cas10	33,27%	33,52%	33,60%
cas11	31,88%	31,68%	31,80%
cas12	34,33%	33,71%	33,27%
cas13	31,79%	32,06%	32,23%
cas14	30,71%	30,40%	30,45%
cas15	30,47%	30,14%	30,15%
cas16	33,98%	33,35%	32,66%
Effet global	34.16%	34.33%	34.33%

MATRICE 2	REPONSE : albédo effectif		
D [50%,80%]	Déc.	mars	juin
cas1	37,00%	37,33%	37,42%
cas2	37,83%	37,93%	37,90%
cas3	38,92%	38,76%	38,60%
cas4	39,65%	39,37%	39,22%
cas5	35,10%	34,79%	34,63%
cas6	36,61%	36,23%	36,04%
cas7	38,00%	37,66%	36,98%
cas8	38,92%	38,50%	37,99%
cas9	32,94%	32,46%	32,24%
cas10	34,12%	33,68%	33,08%
cas11	38,22%	37,78%	37,04%
cas12	39,75%	39,29%	38,59%
cas13	32,14%	31,06%	30,67%
cas14	35,00%	34,28%	33,27%
cas15	34,94%	34,29%	33,40%
cas16	40,29%	39,94%	39,26%
Effet global	36.84%	36.46%	36.24%

Tableau 22 : Calcul de l'albédo effectif des seize cas de chaque matrice (M1 et M2).

e) Les effets moyens des niveaux

Pour chaque niveau d'un facteur donné nous avons effectué le calcul de l'albédo moyen le 21/03, le 21/06 et le 21/12 (Tableau23). Nous aurons la possibilité, ultérieurement, de traduire schématiquement ces effets et de comparer les résultats.

	Niveaux	Déc.	Mars	Juin
Hauteur (H)	H=5m	37,49%	37,94%	38,01%
	H=10m	34,21%	34,53%	34,59%
	H=15m	33,36%	33,36%	33,34%
	H=20m	31,74%	31,49%	31,37%
Densité (D)	D=15%	34,48%	35,01%	35,17%
	D=20%	33,71%	34,02%	34,13%
	D=30%	33,44%	33,44%	33,47%
	D=50%	35,17%	34,85%	34,53%

	Niveaux	Déc.	Mars	Juin
Hauteur (H)	H=5m	38,35%	38,35%	38,35%
	H=10m	37,16%	36,80%	36,80%
	H=15m	36,26%	35,80%	35,80%
	H=20m	35,59%	34,90%	34,90%
Densité (D)	D=50%	34,30%	33,91%	33,91%
	D=60%	35,89%	35,53%	35,53%
	D=70%	37,52%	37,12%	37,12%
	D=80%	39,65%	39,28%	39,28%

Inclinaison (I)	I=0°	34,25%	34,38%	34,34%	Inclinaison (I)	I=0°	38,03%	37,82%	37,44%
	I=10°	34,16%	34,24%	34,20%		I=10°	36,91%	36,58%	36,13%
	I=20°	34,22%	34,32%	34,35%		I=20°	36,45%	36,00%	35,52%
	I=25°	34,15%	34,37%	34,41%		I=25°	35,98%	35,45%	34,99%
Nombre de façades inclinées (N)	N=1F	34,21%	34,17%	34,10%	Nombre de façades inclinées (N)	N=1F	37,44%	37,14%	36,56%
	N=2F	34,00%	34,09%	34,16%		N=2F	36,78%	36,32%	35,90%
	N=3F	34,20%	34,94%	34,83%		N=3F	37,11%	36,79%	36,39%
	N=4F	33,83%	34,12%	34,22%		N=4F	36,04%	35,59%	35,22%

Tableau 23 : Les réponses moyennes (Albédos effectifs moyens) de chaque niveau d'un facteur donné, correspondant aux deux matrices d'expériences M1 et M2.

2. L'effet du cycle saisonnier et diurne

a) L'effet du cycle saisonnier

Les valeurs d'albédo effectif figurant dans le tableau22 (réponses des matrices M1 et M2) montrent que l'effet de la variation saisonnière est négligeable. Les écarts entre les valeurs d'albédo correspondant aux trois dates de simulation sont de l'ordre de 1% (fig.59).

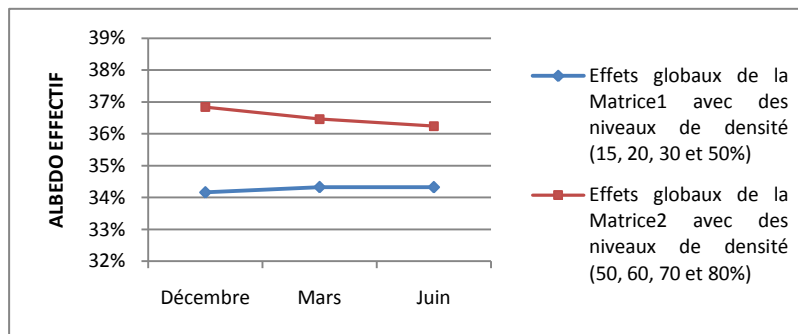


Figure 59 : Tendence de variation saisonnière de l'albédo effectif du tissu plot: Albédo de surface homogène

Bien que l'albédo demeure constant pour les différentes dates, la figure60 montre qu'au sein de la forme urbaine, les façades, les toits et le sol se comportent différemment en fonction de la hauteur solaire. Le poids des surfaces horizontales (les toits et les sols) dans la réflexion solaire prend de l'importance au mois de Juin quand la hauteur solaire est élevée. La situation s'inverse au mois de Décembre : ce sont les surfaces verticales (notamment les façades sud) qui prennent du poids dans la réflexion solaire.

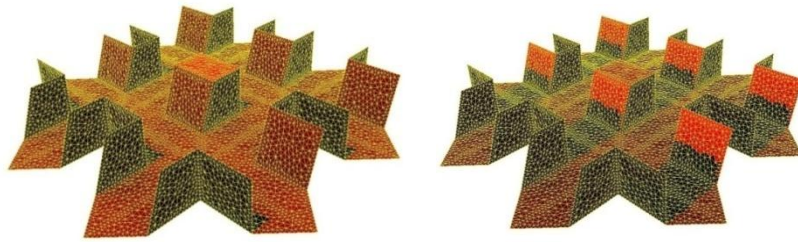


Figure 60 : Modèle type Plot d'angle d'inclinaison des façades 20°, de densité urbaine 20% et de hauteur 20m. Descripteurs affichés : à gauche, énergie réfléchi vers le ciel le 21_06 à 12H. A droite, énergie réfléchi vers le ciel le 21_12 à 12H

b) L'effet du cycle diurne

Pour évaluer l'effet du cycle diurne sur l'albédo effectif, nous avons choisi deux configurations géométriques différentes pour lesquelles le calcul l'albédo horaire a été entrepris durant les journées du 21/12 et 21/06. La figure61 permet d'avoir une idée sur les propriétés géométriques de la première forme urbaine à tester et d'apprécier la variation de comportement des surfaces constitutives en fonction de la hauteur solaire. Les valeurs d'albédo sont consignées dans le tableau13.

- Cas Plot N°13_Matrice 2 : 25° d'inclinaison des façades Nord et Sud, Densité=50%, H=20m (fig12)



Figure 61 : Modèle type Plot d'angle d'inclinaison des façades 25°, de densité urbaine 50% et de hauteur 20m. Descripteurs affichés : à gauche, énergie réfléchi vers le ciel le 21_06 à 5H. A droite, énergie réfléchi vers le ciel le 21_06 à 12H

CHAPITRE G. Analyse du Tissu de Type Plot

Heure	Glob_incid 21_06 (Wh)	Réfléchi_ciel 21_06 (Wh)	albédo	Heure	Glob_incid 21_12 (Wh)	Réfléchi_ciel 21_12 (Wh)	albédo
5	118663	38363	32,33%	5	—	—	—
6	506473	159518	31,50%	6	—	—	—
7	1002640	311387	31,06%	7	—	—	—
8	1498134	463878	30,96%	8	21785	6945	31,88%
9	1935197	596470	30,82%	9	229313	74981	32,70%
10	2268279	693905	30,59%	10	494379	160364	32,44%
11	2475051	752733	30,41%	11	675050	217222	32,18%
12	2546311	769502	30,22%	12	740594	234178	31,62%
13	2487887	755637	30,37%	13	686457	219877	32,03%
14	2279469	695842	30,53%	14	504137	162929	32,32%
15	1946866	598348	30,73%	15	237640	77156	32,47%
16	1506844	465635	30,90%	16	22866	7259	31,75%
17	1006028	312759	31,09%	17	—	—	—
18	523 315	164 051	31,35%	18	—	—	—
19	125 481	40 335	32,14%	19	—	—	—

Albédo effectif le 21_06	30.67%	Albédo effectif le 21_12	32.14%
--------------------------	--------	--------------------------	--------

Tableau 24 : Le calcul des valeurs horaires d'albédo effectif pour les deux dates du 21 décembre et 21 juin. Cas simulé plot N°13 de la matrice 2 (2 façades inclinées de 25°, la densité est de 50% et la hauteur des bâtiments est de 20m).

Les valeurs horaires de l'albédo effectif sont très proches les unes des autres, aussi bien au mois de décembre qu'en Juin (tab.24). Les écarts entre les valeurs sont de l'ordre de 1% à 2%. Cependant, la figure représentant la variation diurne de l'albédo (fig.62) montre que les valeurs ont tendance, généralement, à diminuer au fur et à mesure que la hauteur solaire augmente. En fait, le 21 Juin, la courbe de tendance est parfaitement concave, alors que celle représentative du mois de décembre présente deux pics de valeurs (à 9h et 15h) entre lesquels s'observe une légère décroissance jusqu'à un albédo minimal à midi.

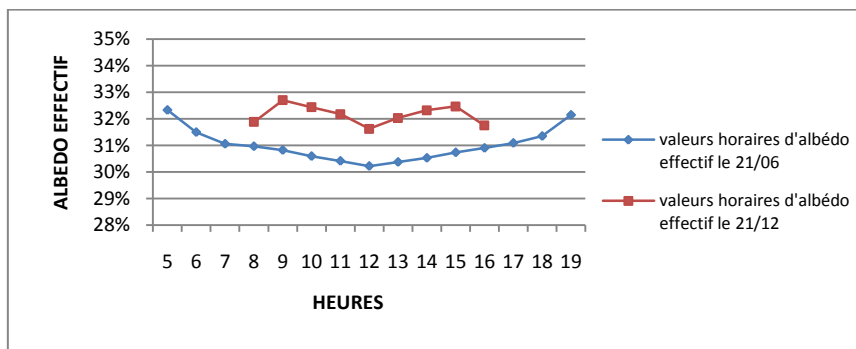


Figure 62 : Tendence de variation diurne de l'albédo effectif le 21/12 et le 21/06. Cas N°13 de la matrice M2.

- **Cas Plot N°09 : 4 façades inclinées de 20°, Densité=50%, H=15m (fig.15)**

Cette fois ci le modèle est doté de quatre façades inclinées. La figure63 permet d’apprécier le comportement optique des façades, du sol et du toit à travers l’affiche du même descripteur (le réfléchi vers le ciel) pour deux horaires différents le 21/06 (5h et 12h). Les valeurs de calcul de Solène sont consignées dans le tableau14.

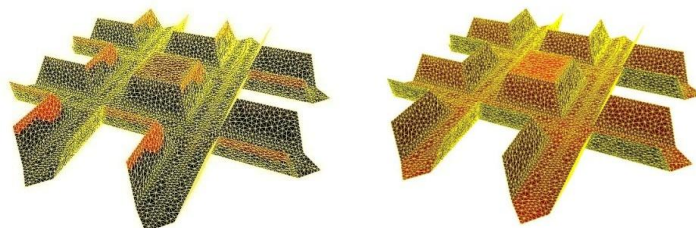


Figure 63 : Modèle type Plot d’angle d’inclinaison des façades 20°, de densité urbaine 50% et de hauteur 15m. Descripteurs affichés : à gauche, énergie réfléchie vers le ciel le 21/06 à 5H. A droite, énergie réfléchie vers le ciel le 21/06 à 12H.

Heures	Glob_incid 21_06	Réfléchi_ciel 21_06	Albédo	Heures	Glob_incid 21_12	Réfléchi_ciel 21_12	Albédo
5	118058	39513	33,47%	5	—	—	—
6	508374	167631	32,97%	6	—	—	—
7	1000762	326793	32,65%	7	—	—	—
8	1495909	485931	32,48%	8	21 975	7 260	33,04%
9	1943867	626828	32,25%	9	229 579	76 941	33,51%
10	2271430	729343	32,11%	10	491 662	162 744	33,10%
11	2482216	794023	31,99%	11	673 628	221 200	32,84%
12	2553164	816798	31,99%	12	742 940	242 231	32,60%
13	2483528	794446	31,99%	13	679 550	222 941	32,81%
14	2278124	730937	32,09%	14	504 272	166 052	32,93%
15	1938281	625045	32,25%	15	236 721	79 034	33,39%
16	1504578	487917	32,43%	16	22 806	7 517	32,96%
17	1010111	329499	32,62%	17	—	—	—
18	523155	171850	32,85%	18	—	—	—
19	126415	42006	33,23%	19	—	—	—

Albédo effectif le 21_06	32,24%	Albédo effectif le 21_12	32,94%
--------------------------	--------	--------------------------	--------

Tableau 25 : Le calcul des valeurs horaires d’albédo effectif pour les deux dates du 21/12 et 21/06. Cas simulé plot N°9 de la matrice 2 (4 façades inclinées de 20°, la densité est de 50% et la hauteur des bâtiments est de 15m).

Les valeurs horaires d’albédo le 21/06 et le 21/12 présentent des écarts faibles. Les valeurs matinales et celles de l’après midi sont généralement plus élevées que les valeurs aux alentours de midi d’après les données du tableau25. Nous observons exactement la même tendance de variation de valeurs que dans le cas précédent (fig.64).

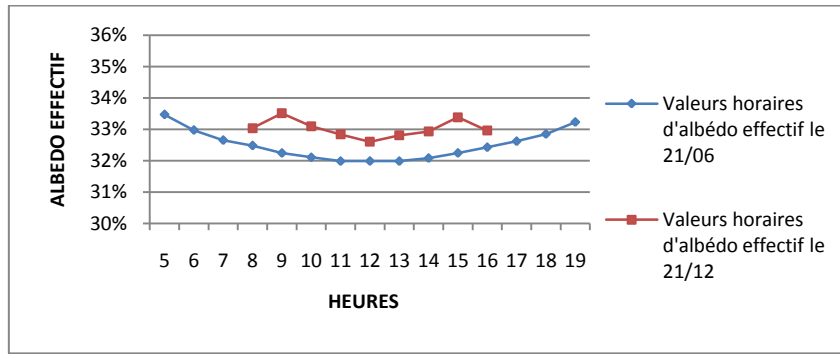


Figure 64 : Tendance de variation diurne de l'albédo effectif le 21/12 et le 21/06. (Cas N°9 de la matrice M2)

c) Conclusion

Les valeurs hivernales d'albédo urbain sont légèrement plus élevées que celles d'été. Par ailleurs, en termes d'albédo diurne, les valeurs matinales et celles précédant le coucher sont également en hausse par rapport aux horaires proches de midi : nous admettons alors que plus l'angle azimutal solaire est important (hauteur solaire faible) plus l'albédo effectif est élevé. Mais, cette hausse est d'autant plus faible que nous ne pouvons statuer sur l'importance de l'effet de la hauteur solaire. Nous pouvons dire alors que l'albédo effectif n'est pas sensible à la variation du cycle diurne et saisonnier pourvu que l'albédo des surfaces urbaines soit homogène.

3. L'effet de la hauteur de la canopée urbaine

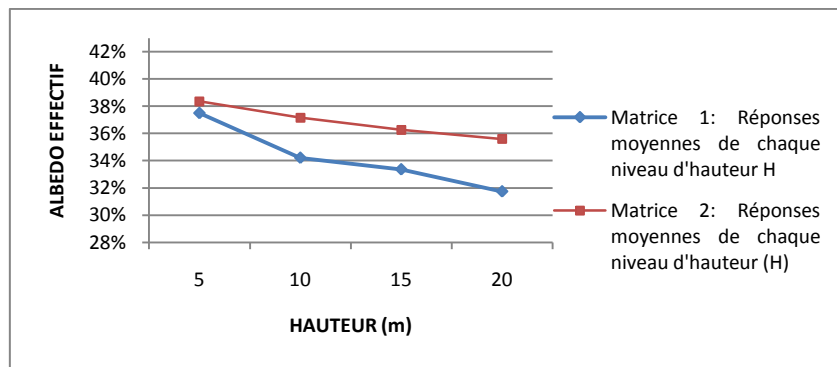


Figure 65 : L'effet de la hauteur de la canopée urbaine sur l'albédo effectif. (Tissu Plot, albédo de surface homogène).

L'albédo effectif diminue avec la hauteur de la canopée urbaine et cette diminution est d'autant plus importante que la densité du tissu est faible. En effet, la figure65 montre bien que l'albédo est d'autant plus sensible à la variation de la hauteur dans le cas de la matrice1 que la matrice2 (comparer l'inclinaison des deux courbes).

4. L'effet de la densité urbaine

Kondo (2001) trouve que la variation de l'albédo en fonction de la densité est complexe. Le fait de ne faire varier la densité urbaine tout en gardant fixe la hauteur des bâtiments n'a pas donné lieu à une tendance claire et interprétable de variation de l'albédo. Groleau, quant à lui, abouti à un résultat intéressant: En faisant varier la densité et le pourcentage de surface de façades, il s'est rendu compte que l'albédo décroît jusqu'à une densité 20 à 30% puis remonte pour les densités plus élevées. La méthode des plans d'expériences s'est avérée, elle aussi, pertinente dans l'élucidation de ce phénomène. L'intérêt de cette méthode est qu'elle intègre, pour l'évaluation de l'effet de la densité, d'autres facteurs morphologiques outre la hauteur de la canopée urbaine (l'inclinaison des façades et le nombre de façades inquitines par bâtiment).

Les figures 66 et 67 donnent l'allure de la courbe de variation de l'albédo effectif en fonction de la densité. Peu importe la hauteur des bâtiments, la tendance de variation de l'albédo est toujours la même. La figure montre également que les trois courbes de tendance correspondant aux trois dates de simulation (déc., mars et juin) se croisent au niveau de la même densité 30%.

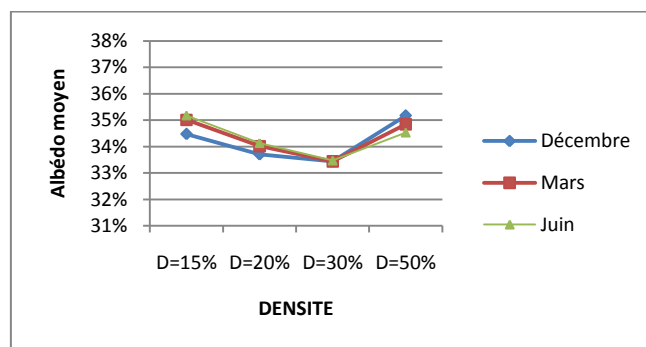


Figure 66 : L'effet de la densité urbaine sur l'albédo effectif pour la plage de densité 15-50%

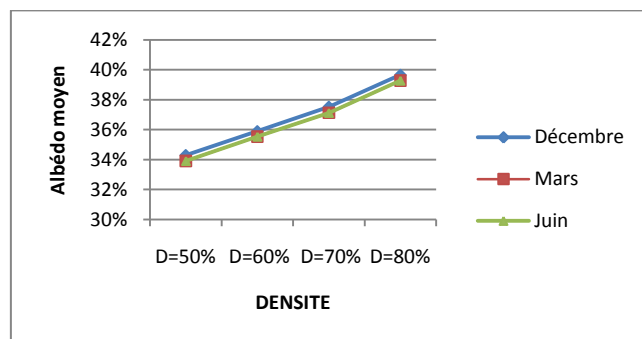


Figure 67 : l'effet de la densité urbaine sur l'albédo effectif pour la plage de densité 50-80% (tissu plot, albédo homogène).

5. L'effet de l'inclinaison des façades

a) La méthode des plans d'expériences

Les effets de la variation de l'angle d'inclinaison des façades et du nombre de parois inclinées par bâtiment révèlent des résultats qui n'obéissent pas à une logique évidente a priori: Alors que l'albédo subit une décroissance en fonction des facteurs précédemment cités, pour les densités comprises entre 50 et 80%, il n'existe aucun effet pour les densités inférieures à 50% (fig68). Le recours à la méthode classique s'avère indispensable pour s'assurer des résultats révélés par la méthode des plans d'expériences.

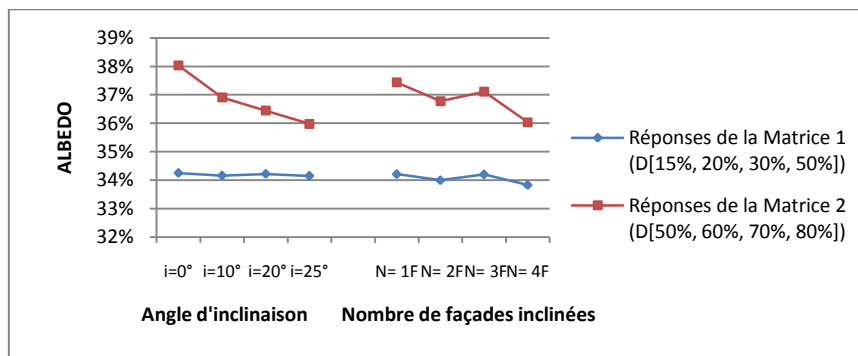


Figure 68 : L'effet de l'inclinaison des façades sur la variation de l'albédo effectif du tissu plot, le 21/12, pour deux plages de densité différentes.

b) Le recours à la méthode classique

Nous avons dû effectuer 81 cas de simulation supplémentaires afin de vérifier la tendance de variation de l'albédo effectif en fonction de l'angle d'inclinaison des façades. Nous avons opté pour une géométrie de hauteur fixe (15m). Pour chaque cas de densité (D) donnée, trois niveaux d'inclinaison (I) ont été affectés aux façades (0°, 10° et 20°). Dans le tableau26 sont consignées les valeurs d'albédo effectif le 21/12 pour les quatre typologies de formes dénommées 1F, 2F, 3F et 3F correspondant au nombre de façades inclinées par bâtiment.

(H=15m)	Angle (I)	Densité									
		15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	
N=1Façade Inclinée/bât	0°	31,0%	30,6%	31,1%	32,3%	33,9%	35,8%	37,9%	40,1%	42,5%	
	10°	31,3%	31,0%	31,3%	32,3%	33,7%	35,4%	37,4%	39,5%	41,6%	
	20°	31,8%	31,4%	31,5%	32,4%	33,6%	35,2%	37,0%	39,0%	41,1%	
N=2Façades Inclinée/bât	0°	31,0%	30,6%	31,1%	32,3%	33,9%	35,8%	37,9%	40,1%	42,5%	
	10°	31,4%	31,0%	31,1%	31,9%	33,3%	34,9%	36,7%	38,7%	40,9%	
	20°	32,0%	31,4%	31,0%	31,7%	32,7%	34,1%	35,8%	37,5%	39,4%	
N=3Façades Inclinées/bât	0°	31,0%	30,6%	31,1%	32,3%	33,9%	35,8%	37,9%	40,1%	42,5%	
	10°	31,8%	31,2%	31,2%	31,9%	33,0%	34,5%	36,1%	38,0%	39,8%	
	20°	32,9%	32,1%	31,5%	31,8%	32,6%	33,7%	34,9%	36,4%	37,9%	
N=4Façades Inclinées/bât	0°	31,0%	30,6%	31,1%	32,3%	33,9%	35,8%	37,9%	40,1%	42,5%	
	10°	31,9%	31,3%	31,0%	31,6%	32,7%	34,0%	35,6%	37,3%	39,2%	
	20°	33,4%	32,4%	31,5%	31,6%	32,1%	33,0%	34,1%	35,4%	36,8%	

Tableau 26 : Calcul de l'albédo effectif le 21/12 pour chaque configuration urbaine de densité D donnée, en fonction de l'angle d'inclinaison des façades. La hauteur des modèles étant de 15m.

▪ **L'effet de la variation de l'angle d'inclinaison (I)**

Les courbes de tendance de variation de l'albédo en fonction de l'inclinaison des façades donnent des résultats différents de ceux obtenus par la méthode des plans d'expériences. Nous proposons, pour une compréhension plus aisée du phénomène, trois modes de représentation graphique du même phénomène : Nous aurons l'opportunité d'observer l'effet de l'inclinaison des façades par pas de densité de 10%, pour le cas N=4F (quatre façades inclinées par bâtiment). Fig.69, fig.70 et fig.71. (les autres cas N=1F, 2F et 3F correspondent aux annexes 1, 2 et 3).

Le premier constat est que nous observons la tendance, qui nous est désormais familière, de l'effet de la densité urbaine sur la variation de l'albédo effectif : Même les nouvelles configurations simulées sont donc assujetties aux mêmes effets que les formes aux façades verticales. La deuxième remarque est que l'effet de l'inclinaison sur l'albédo est le même quelque soit le nombre de façades inclinées : La variation est parfaitement linéaire en fonction de l'angle d'inclinaison mais elle n'est pas univoque car il y a inversion d'effet à partir d'une certaine valeur de densité :

➤ Pour les densités inférieures à (30%, 40%), l'albédo effectif augmente en fonction de l'angle d'inclinaison (I) : les segments de droite prennent une allure ascendante mais de moins en moins prononcée en se rapprochant du niveau seuil (30%, 40%).

➤ Aux alentours de (30, 40%) de densité, l'inclinaison des façades ne présente plus aucune d'influence sur l'albédo effectif (segment de droite horizontal).

➤ Au-delà de la densité (30, 40%), l'albédo effectif décroît en fonction de l'angle d'inclinaison, et cette décroissance est d'autant plus importante que la densité est forte : Les segments de droite prennent une pente de plus en plus forte.

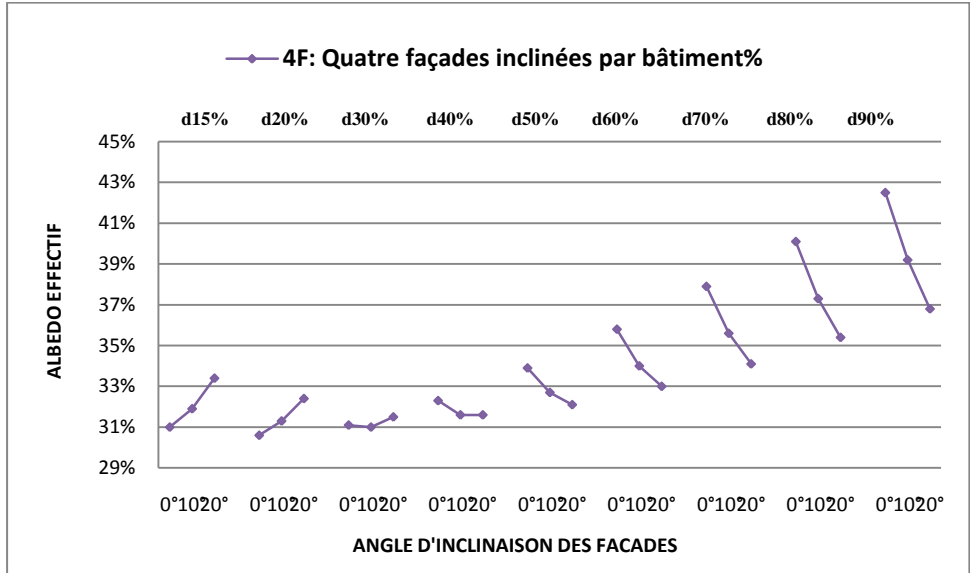


Figure 69 : Mode de représentation graphique N°1 de l'effet de l'inclinaison des façades sur l'albédo effectif du modèles plot, le 21/12.

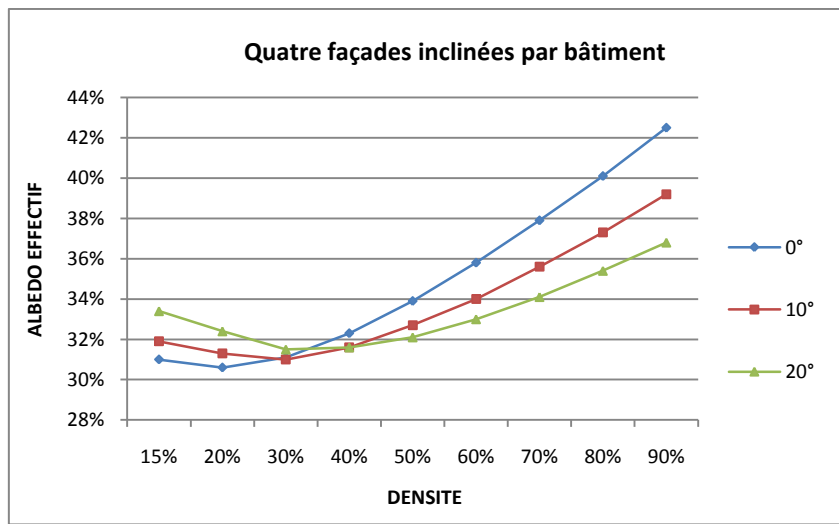


Figure 70 : Mode de représentation graphique N°2 de l'effet de l'inclinaison des façades sur l'albédo effectif du modèles plot, le 21/12.

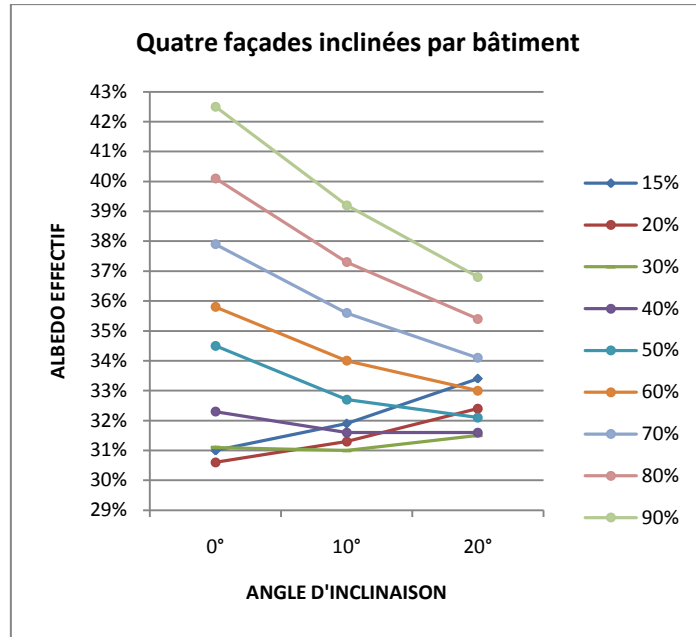


Figure 71 : Mode de représentation graphique N°3 de l'effet de l'inclinaison des façades sur l'albédo effectif du modèles plot, le 21/12.

▪ *L'effet de la variation du nombre de façades inclinées par bâtiment*

La variation de l'albédo effectif est d'autant plus prononcée que le nombre de façades inclinées par bâtiment est élevé. La constance des valeurs d'albédo au niveau de la densité 30% se confirme. (fig.72).

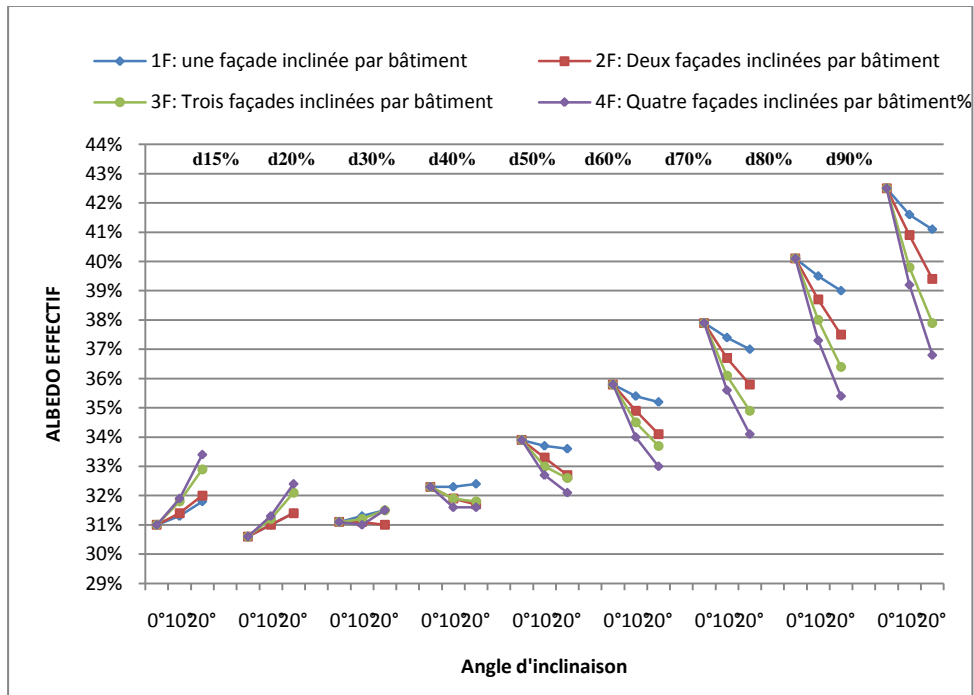


Figure 72 : Effet de la variation de l'angle d'inclinaison des façades et du nombre des façades inclinées par bâtiment sur l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.

▪ ***Pourquoi la méthode des plans d'expérience n'a-t-elle pas donné les mêmes tendances ?***

En fait, la méthode de calcul des effets moyens des niveaux explique cette différence : Regardant la plage de densité 15-50% de la matrice1, l'effet de chaque niveau (I_0° , I_{10° , I_{20° et I_{25°) est évalué en faisant la moyenne des valeurs d'albédo effectif correspondant aux cas de densité ($D_{15\%}$, $D_{20\%}$, $D_{30\%}$ et $D_{50\%}$). Pour tracer la courbe de l'effet de l'inclinaison il faut quatre points correspondant aux valeurs suivantes :

$$\text{Effet de } I_0^\circ = (\text{albédo}_{(i0^\circ, D15\%)} + \text{albédo}_{(i0^\circ, D20\%)} + \text{albédo}_{(i0^\circ, D30\%)} + \text{albédo}_{(i0^\circ, D50\%)}) / 4$$

$$\text{Effet de } I_{10^\circ} = (\text{albédo}_{(i10^\circ, D15\%)} + \text{albédo}_{(i10^\circ, D20\%)} + \text{albédo}_{(i10^\circ, D30\%)} + \text{albédo}_{(i10^\circ, D50\%)}) / 4$$

$$\text{Effet de } I_{20^\circ} = (\text{albédo}_{(i20^\circ, D15\%)} + \text{albédo}_{(i20^\circ, D20\%)} + \text{albédo}_{(i20^\circ, D30\%)} + \text{albédo}_{(i20^\circ, D50\%)}) / 4$$

$$\text{Effet de } I_{25^\circ} = (\text{albédo}_{(i25^\circ, D15\%)} + \text{albédo}_{(i25^\circ, D20\%)} + \text{albédo}_{(i25^\circ, D30\%)} + \text{albédo}_{(i25^\circ, D50\%)}) / 4$$

Or l'effet de l'inclinaison sur l'albédo diffère d'une densité à une autre voir même s'inverse dans la marge ($D_{15\%}$, $D_{50\%}$). Conséquemment, la courbe d'effet du facteur « Inclinaison », n'est que la résultante des effets divers manifestes entre les densités 15% et 50% : Son allure horizontale est signe d'une influence nulle. Il s'avère donc que la méthode des plans d'expériences est une méthode avantageuse, simple et rapide mais qui s'applique à des facteurs indépendants entre eux tels que la hauteur H et la densité D. Quand il s'agit d'un facteur entretenant une relation complexe avec un autre (l'inclinaison avec la densité), il faut avoir recours à des approches plus complexes pour l'étude des interactions.

c) CONCLUSION

L'étude de l'effet des facteurs (I) et (N) a été menée en passant par la méthode de plan d'expérience puis la méthode classique. Une matrice simple, sans calcul des interactions entre les facteurs, ne permet pas d'élucider l'effet de l'inclinaison des façades sur l'albédo effectif. Ce ci ne met pas en doute l'efficacité de la méthode de Taguchi dans l'appréciation des effets de facteurs complexes, car nous n'avons profité de la méthode que de manière simple et rapide (il en existe de plus complexe susceptibles d'étudier les interactions).

Nous avons montré, grâce à la méthode classique d'expérience dont le plus grand inconvénient est le nombre élevé de simulations, que la variation de l'angle d'inclinaison des façades influe sur l'albédo effectif. Celui-ci est d'autant plus important que l'angle d'inclinaison des façades est élevée et pourvue que la densité soit faible, en dessous du seuil de (30%, 40%) pour lequel l'inclinaison n'a aucun effet. Au-delà de ce seuil de densité, l'effet de

l'inclinaison des façades s'inverse : L'albédo effectif décroît en fonction de (I) et ce de façon beaucoup plus rapide en fonction de la densité. Les figures 69, 70, 71 et 72 illustrent bien l'écartement de valeurs d'albédo effectif au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la densité seuil (30%, 40%). Cet espacement de courbes est d'autant plus important que le nombre de façades inclinées par bâtiment est élevé.

III. LES PRECAUTIONS D'EMPLOI DE LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

1. Linéarisation des effets des niveaux

La méthode des plans d'expériences linéarise les variations entre les niveaux des facteurs. Si nous avons choisi des niveaux qui s'écartent beaucoup les uns par rapport aux autres, il est fort probable que les effets des facteurs ainsi que les tendances de variation de la réponse soient erronés. Pour contourner ce problème il faudrait mieux choisir des niveaux rapprochés (soit plus de niveaux, ce qui multiplie le nombre de calculs). Prenons l'exemple concret des niveaux de densités choisis dans notre matrice d'expérience. Nous savons au préalable, d'après les résultats de Groleau, que l'albédo diminue jusqu'à une densité [20,30%] puis remonte rapidement. Il a été indispensable pour nous de respecter deux conditions :

- Choisir des valeurs de densité proches les unes des autres (15%, 20%, 30%, 50%, 60%, 70%, 80% et 90%)
- Intégrer dans la matrice les densités 20% et 30% au niveau desquels il y a un tournant dans la variation de l'albédo, de façon à éviter le saut des valeurs d'albédo urbain pour ces deux niveaux.

▪ *Graphes de l'effet de la densité sans et avec considération des niveaux de densité intermédiaires 20% et 30%*

Pour la méthode des plans d'expériences, si l'on n'intègre pas dans la matrice les valeurs des niveaux intermédiaires, l'albédo augmente de façon linéaire entre la densité 15 et 50%. Au cas où les valeurs de densité 20 et 30% sont prises en compte dans le calcul des effets des facteurs, la tendance de variation de la réponse est telle que l'albédo diminue jusqu'à 30% puis remonte rapidement (fig73).

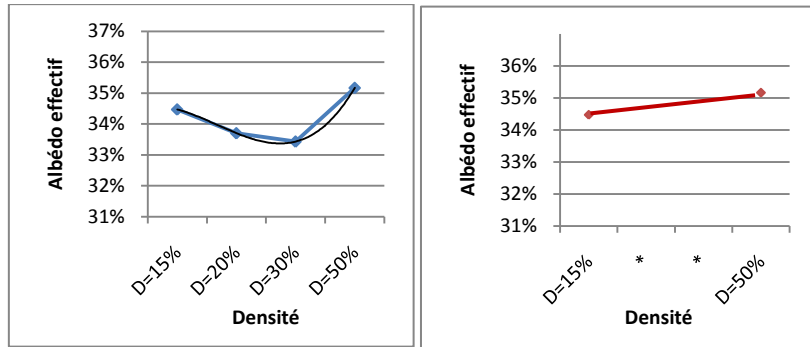


Figure 73 : Les courbes de variation de l'albédo effectif sans et avec prise en considération dans la matrice des valeurs intermédiaires de densité 20 et 30%.

2. Les interactions

Il s'est avéré que la méthode des plans d'expériences, avec une matrice comprenant uniquement des facteurs (sans étude des interactions), présente d'énormes lacunes dans notre cas d'étude. En effet, bien que nous ayons pu confirmer les résultats de l'effet « complexe » de la densité sur l'albédo effectif grâce à la méthode de Taguchi, nous étions incapables de prévoir la variation de ce même albédo en fonction de l'angle d'inclinaison des façades (le problème aurait pu être résolu par le moyen de méthodes plus complexes d'étude des interactions).

Pourquoi les graphes de tendance nous ont-ils affiché de tels résultats ?

L'effet de la densité n'est pas perturbé par les autres facteurs du fait qu'elle n'entretient aucune liaison complexe avec les autres facteurs. Quant au facteur « inclinaison des façades », lui, il dépend du facteur « densité » dont l'effet sur l'albédo effectif est complexe (déviation de la tendance de variation au niveau de la densité 30%). Cette valeur seuil 30% présente également un point de déviation du sens de variation de l'albédo en fonction de l'inclinaison. Le calcul des effets moyens de chaque niveau d'angle d'inclinaison (0°, 10°, 20° et 25°) a été effectué pour une plage de densité comprenant des niveaux inférieurs et supérieurs à 30% (Matricel). Si nous revenons à la formule de calcul de l'effet moyen d'un niveau, nous comprenons la raison pour laquelle la courbe d'effet affiche une variation nulle de l'albédo en fonction du facteur en question :

$$\text{Effet de } I^\circ = \frac{\sum \text{Albédo effectif correspondant à l'inclinaison en question, pour les densités 15,20,30 et 50\%}}{4}$$

Enfin, nous tenons aussi à expliquer que les tendances de variation des effets de facteurs obtenues grâce à la méthode des plans d'expérience sont des tendances générales qui donnent une appréciation globale sur un phénomène

donné. A titre d'exemple, la méthode n'illustre pas graphiquement l'effet de la densité urbaine sur l'albédo effectif pour une hauteur donnée comme l'a fait GROLEAU (les courbes de hauteur).

IV. LES CONTRIBUTIONS DES SURFACES URBAINES

Pour évaluer les effets des facteurs morphologiques sur les contributions des surfaces urbaines, nous avons eu recours aux mêmes matrices précédentes. Pour les seize cas de chaque matrice, nous avons calculé les contributions des surfaces du sol, toit et façades comme de nouvelles réponses. Les trois dates du 21/3, 21/06 et le 21/12 sont également prises en compte dans les calculs. Théoriquement, les valeurs de contributions peuvent varier de 0% à 100% (à l'encontre des valeurs d'albédo effectif qui ne peuvent dépasser la valeur de réflectivité choisie qui est de 45%). Nous avançons, à chaque fois, les tableaux de valeurs des contributions de chaque surface, ainsi que les tableaux des effets moyens (réponses moyennes) des niveaux de facteurs considérés dans les matrices. Ensuite, nous présenterons les graphiques des effets de facteurs sur les contributions du sol, toit et façades afin de les analyser.

1. Les contributions du sol à l'albédo effectif

ESSAIS	Matrice1 : D [15%, d50%]			ESSAIS	Matrice2 : D [50%, d80%]		
	Réponses : CONTRIB_SOL				Réponses : CONTRIB_SOL		
	Déc.	Mars	Juin		Déc.	Mars	Juin
1	71,70%	76,10%	77,80%	1	22,50%	29,30%	32,10%
2	64,70%	70,20%	72,30%	2	13,90%	20,00%	23,00%
3	51,90%	58,70%	61,40%	3	9,60%	12,90%	15,90%
4	29,30%	37,80%	40,40%	4	5,40%	8,30%	10,70%
5	60,10%	69,40%	73,10%	5	15,80%	21,20%	26,50%
6	48,80%	58,90%	62,90%	6	6,80%	8,60%	12,50%
7	33,70%	45,20%	51,00%	7	3,40%	4,00%	8,10%
8	15,10%	23,90%	29,30%	8	1,50%	1,90%	5,40%
9	64,70%	75,30%	79,20%	9	17,60%	25,40%	32,60%
10	54,10%	64,40%	70,10%	10	11,10%	13,30%	19,60%
11	24,80%	32,70%	39,50%	11	1,50%	1,70%	3,30%
12	8,70%	10,80%	17,60%	12	0,60%	0,50%	1,20%
13	53,20%	70,00%	76,40%	13	10,00%	16,70%	26,40%
14	34,40%	45,90%	56,00%	14	3,30%	3,90%	8,50%
15	27,60%	37,20%	46,40%	15	2,70%	3,40%	7,10%
16	5,50%	6,60%	11,60%	16	0,30%	0,20%	0,40%

Tableau 27 : Les valeurs des contributions des sols à l'albédo effectif (matrices M1 et M2).

a) L'effet du cycle saisonnier

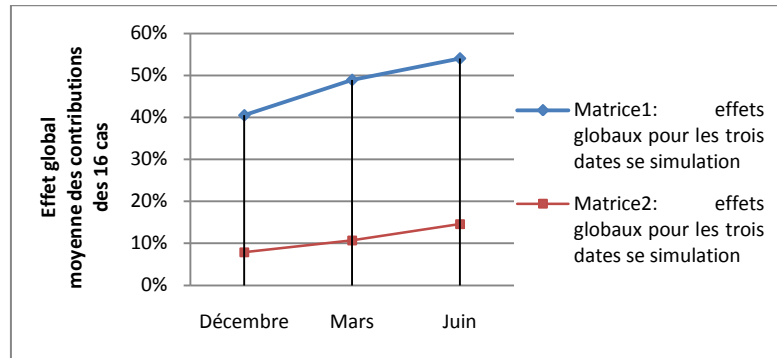


Figure 74 : L'effet du cycle saisonnier sur la contribution du sol à l'albédo effectif (tissu Plot).

Le poids du sol dans la réflexion solaire est d'autant plus important que la hauteur solaire est élevée (tab27 et fig74). En effet, avec la hauteur solaire, le flux incident en profondeur du tissu urbain augmente faisant accroître le flux réfléchi vers les surfaces adjacentes mais aussi vers le ciel par les surfaces de contours du sol. Par ailleurs, la contribution du sol à la réflexion est plus sensible à la hauteur solaire quand la densité du tissu urbain est faible (comparer les deux courbes de la matrice1 et 2).

b) L'effet des facteurs morphologiques (H, D, I et N)

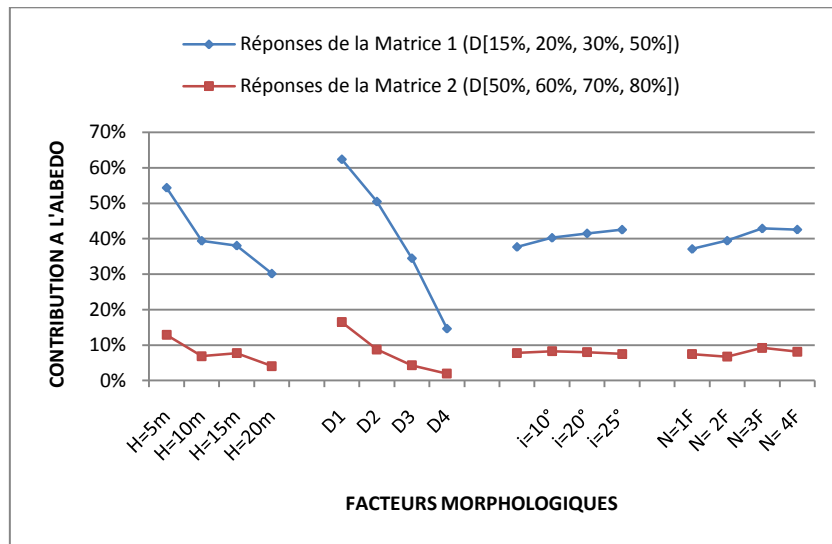


Figure 75 : L'effet des facteurs morphologiques sur la contribution de la surface du sol à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.

En se référant à l'annexe3, nous pouvons tracer les graphiques des effets de la hauteur H, de la densité D, et des facteurs d'inclinaison des façades (I et N) le 21/12, en admettant que les mêmes effets se produisent pour les deux dates

restantes. Pour chaque matrice, émergent quatre courbes de variation de la contribution du sol en fonction de ces deux facteurs (fig75).

▪ ***L'effet de la densité (D)***

Les contributions du sol sont d'autant plus importantes que les densités sont faibles (tab.27, la matrice M1). On remarque aussi que les variations sont plus rapides dans la marge des valeurs de densité 15-50% (fig.75).

Nous attirons l'attention sur que fait que l'aspect des courbes d'effet de la densité, correspondant aux deux plages de densité évoquées, est différent. Celle relative aux densités inférieures à 50% est légèrement convexe, l'autre est concave. Ce ci suppose que si la courbe était en un seul morceau, elle aurait admis, quelque part, un point d'inflexion. Nous revenons sur cet aspect ultérieurement.

▪ ***L'effet de la hauteur (H)***

La hauteur des bâtiments joue un rôle moins important que la densité dans la variation de la contribution du sol à la réflexion solaire. Quand même, cette contribution diminue avec la hauteur de la canopée urbaine (fig75). Dans un contexte urbain de forte densité, la contribution du sol à la réflexion devient peu sensible à la variation de la hauteur des bâtiments (comparer les pentes de courbes).

▪ ***L'effet de l'inclinaison des façades (I et N)***

La figure montre que l'inclinaison de façades influe sur la contribution du sol à l'albédo effectif en ce quelle fait augmenter les valeurs de celui-ci dans le cas où les densités sont élevées. Dans le cas contraire, pour une densité comprise entre 15% et 50%, l'inclinaison ne semble avoir aucun effet sur la contribution du sol. Il en est de même pour l'effet du facteur (N) correspondant au nombre de façades concernées par l'inclinaison : Les mêmes effets se produisent que ce soit pour les densités faibles ou fortes.

Compte tenu de la complexité du facteur d'inclinaison et des limites qui nous ont été imposées par la méthode de plan d'expériences, nous avons effectué des simulations classiques. La figure76 confirme les résultats précédents mais en explicitant mieux le phénomène. La contribution du sol à l'albédo effectif est d'autant plus importante que :

- l'angle d'inclinaison des façades (I) est élevé ;
- le nombre de façades inclinées (N) est élevé ;
- la densité (D) est faible.

La figure montre que les segments de droite représentatifs des configurations 1F, 2F, 3F et 4F (désignant le nombre de façades inclinées par bâtiment) se superposent au-delà de la densité 70%.

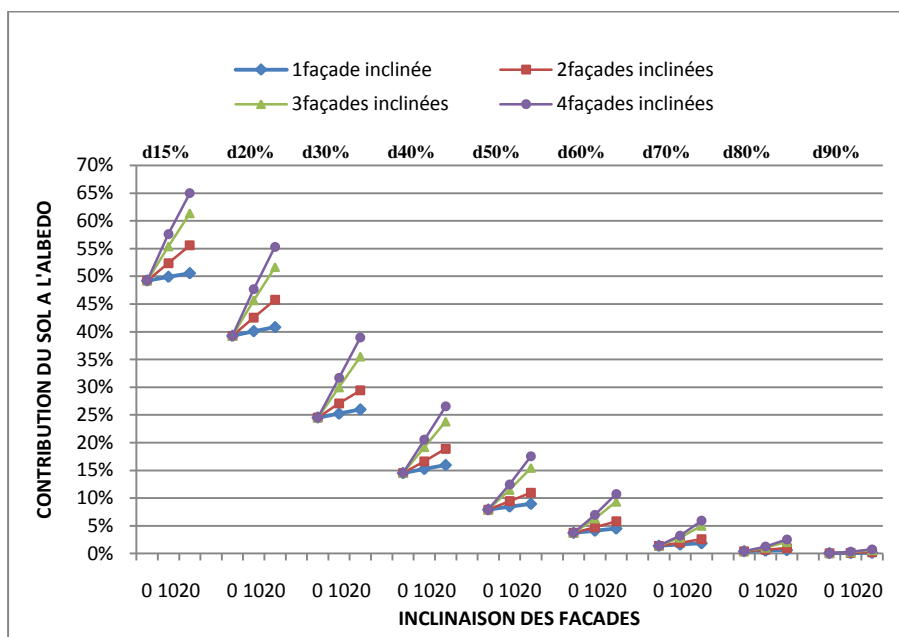


Figure 76 ; L'effet de l'inclinaison des façades sur la contribution du sol à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.

2. Les contributions des toits à l'albédo effectif

ESSAIS	Matrice1 : D [15%, d50%]		
	CONTRIB_TOIT		
	Déc.	Mars	Juin
1	17,80%	17,60%	17,50%
2	22,10%	21,80%	21,70%
3	29,20%	28,90%	28,90%
4	45,10%	44,90%	44,90%
5	15,60%	15,30%	15,30%
6	26,70%	26,30%	26,10%
7	32,60%	32,60%	32,70%
8	50,90%	51,40%	51,60%
9	3,70%	3,70%	3,70%
10	6,90%	6,90%	6,90%
11	41,80%	42,30%	42,30%
12	60,10%	61,20%	62,30%
13	0,80%	0,80%	0,80%
14	19,40%	19,80%	19,80%
15	24,10%	24,50%	24,50%
16	65,50%	67,10%	68,50%

Effet global	28,89%	29,07%	29,22%
--------------	--------	--------	--------

ESSAIS	Matrice2 : D [50%, d80%]		
	CONTRIB_TOIT		
	Déc.	Mars	Juin
1	60,60%	60,10%	60,00%
2	67,50%	68,00%	67,90%
3	70,10%	70,80%	71,20%
4	72,50%	73,10%	73,50%
5	54,50%	55,00%	55,40%
6	72,90%	74,10%	74,90%
7	73,10%	74,40%	75,40%
8	76,70%	78,10%	79,10%
9	32,30%	32,90%	33,20%
10	41,00%	41,70%	42,50%
11	82,30%	83,20%	84,70%
12	85,30%	85,90%	87,60%
13	32,70%	34,00%	34,50%
14	62,00%	63,60%	65,60%
15	61,70%	63,00%	64,90%
16	89,40%	89,90%	91,40%

Effet global	64,66%	65,49%	66,36%
--------------	--------	--------	--------

Tableau 28 : Tableaux des valeurs des contributions du sol à l'albédo effectif (matrices M1 et M2).

a) L'effet du cycle saisonnier

Pour une géométrie donnée, la contribution des toits à l'albédo effectif est faiblement sensible à la variation saisonnière (tab28): Les surfaces horizontales de toitures, situées au même niveau de hauteur, réfléchissent le maximum de flux qu'elles puissent vers le ciel (en fonction de leur réflectivité). Malgré que ce flux réfléchi soit d'autant plus intense que la hauteur solaire est élevée, il faut savoir aussi que la réflexion du sol prend simultanément de l'ampleur : En termes de contribution à l'albédo effectif, un équilibre s'installe durant tout le cycle saisonnier dû à l'effet de compensation de la surface du sol.

b) L'effet des facteurs morphologiques

Après avoir calculé des effets moyens des facteurs sur la contribution des toits à l'albédo (Annexe4), nous procédons au tracé du graphe permettant de percevoir les tendances de variations : Les courbes bleues désignent les résultats de la matrice1 d'expérience, celles en rouge désignent les résultats de la matrice2. Il est possible de comparer les aspects de courbes afin de dégager les différences de poids entre les facteurs de la même matrice mais également le poids du même facteur pour les deux plages de densité différentes 15-50% et 50-80% (fig77).

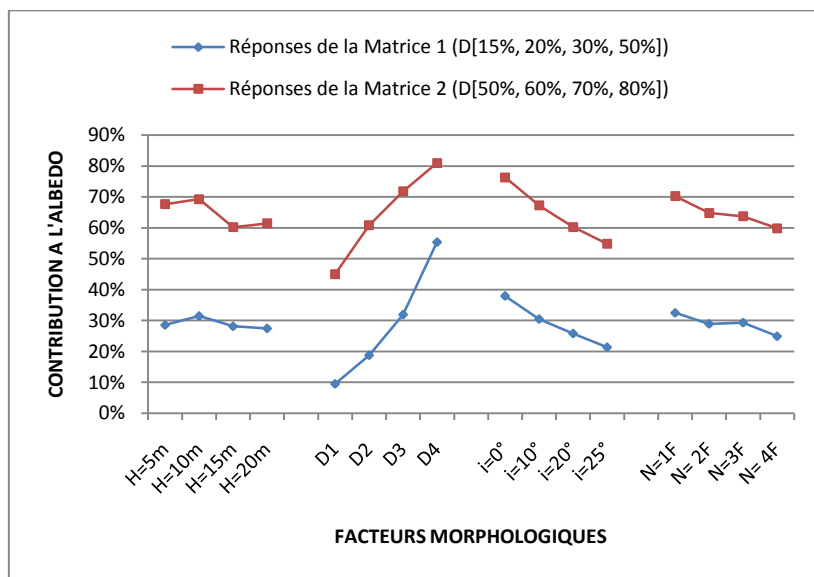


Figure 77 : L'effet des facteurs morphologiques sur la contribution des toits à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12

▪ L'effet de la hauteur (H)

Si l'on considère le nuage de points correspondant aux valeurs de contributions des toits en fonction de la hauteur des bâtiments, nous statuons sur une faible sensibilité pour la plage de valeurs de densité 15%-50%. Entre 50%-80%, malgré la baisse de 10% observée entre les niveaux 10m et 15m,

nous admettons également que la contribution des toits demeure peu sensible à la variation de la hauteur des bâtiments.

▪ *L'effet de la densité (D)*

La densité a pour effet d'augmenter la contribution des toits à l'albédo effectif. Plus la densité est forte et plus la surface des toits augmente, bénéficiant d'un flux incident plus grand, d'où son grand apport réfléchif vers le ciel. Cette variation est linéaire, néanmoins, on constate que les courbes correspondant aux plages de niveaux de densité 15%-50% et 50%-80% prennent respectivement un aspect concave et convexe. Ce ci suppose que la courbe entière de l'effet de la densité sur la contribution des toits a un point d'inflexion.

▪ *L'effet de l'inclinaison des façades (facteurs N et I)*

Etant la cause directe de la réduction de la surface des toits, l'inclinaison des façades concoure à réduction de la contribution du sol à l'albédo effectif, quel que soit le niveau de densité. Moins la surface des toits est importante plus le flux incident est faible, d'où la faible proportion du flux réfléchi vers le ciel. Nous avons procédé de la même façon que pour la surface du sol, c'est-à-dire que nous nous sommes appuyés sur d'autres simulations en dehors de la matrice d'expérience afin d'étalonner les résultats. 27 cas de simulations nous ont permis de tracer le graphique suivant (fig78).

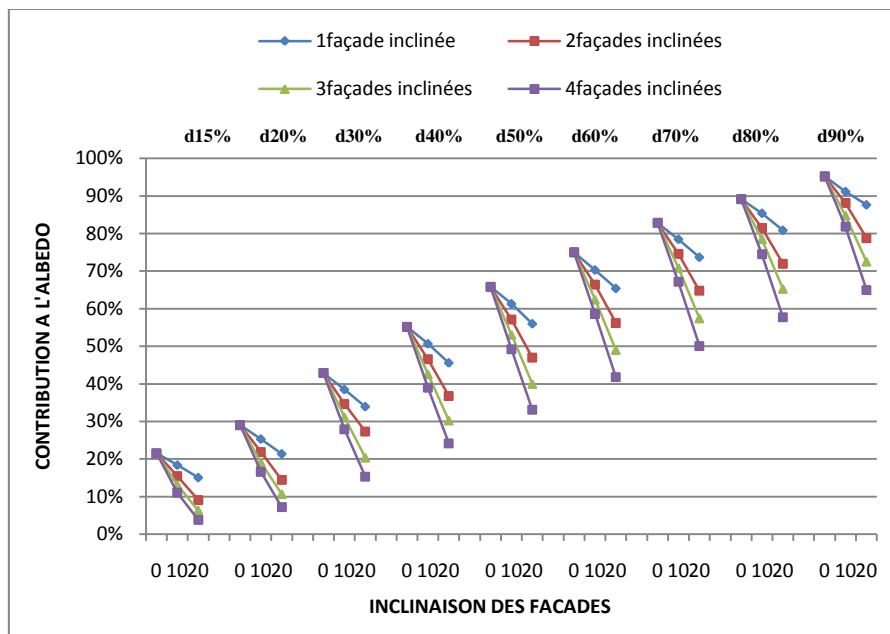


Figure 78 : L'effet de l'inclinaison des façades sur la contribution des toits à l'albédo effectif : tissu plot.

La figure78 confirme que la contribution des toits augmente avec l'angle d'inclinaison des façades. Les toits sont beaucoup plus sensibles au facteur d'inclinaison que le nombre de façades inclinées est élevé et que la densité est forte.

3. Les contributions des façades à l'albédo effectif

ESSAIS	Matrice1 : D [15%, 50%]			ESSAIS	Matrice2 : D [50%, 80%]		
	CONTRIB. FACADES				CONTRIB. FACADES		
	Déc.	Mars	Juin		Déc.	Mars	Juin
1	10,50%	6,30%	4,70%	1	17,00%	10,60%	7,90%
2	13,20%	7,90%	6,00%	2	18,60%	12,10%	9,10%
3	18,90%	12,40%	9,70%	3	20,40%	16,20%	12,90%
4	25,50%	17,20%	14,60%	4	22,10%	18,50%	15,80%
5	24,30%	15,20%	11,60%	5	29,60%	23,70%	18,10%
6	24,50%	14,80%	11,00%	6	20,30%	17,30%	12,60%
7	33,70%	22,20%	16,20%	7	23,50%	21,60%	16,50%
8	34,00%	24,70%	19,00%	8	21,80%	20,00%	15,50%
9	31,50%	21,00%	17,10%	9	50,10%	41,70%	34,20%
10	39,00%	28,80%	23,10%	10	48,00%	44,90%	37,90%
11	33,40%	25,00%	18,20%	11	16,20%	15,10%	11,90%
12	31,20%	27,90%	20,10%	12	14,10%	13,60%	11,20%
13	46,00%	29,20%	22,80%	13	57,30%	49,30%	39,00%
14	46,20%	34,30%	24,20%	14	34,70%	32,50%	25,90%
15	48,30%	38,20%	29,00%	15	35,60%	33,70%	28,10%
16	29,00%	26,30%	19,90%	16	10,30%	9,90%	8,10%

Effet global	30,58%	21,96%	16,70%
--------------	--------	--------	--------

Effet global	27,48%	23,79%	19,04%
--------------	--------	--------	--------

Tableau 29 : Les valeurs des contributions des façades du modèle plot à l'albédo effectif (matrices M1 et M2).

c) L'effet de la variation saisonnière

Le calcul des effets globaux (tab29) pour chaque date de simulation permet de mesurer l'effet du cycle saisonnier sur l'albédo. Avec la hauteur solaire la contribution des façades à l'albédo effectif est de plus en plus faible (fig79).

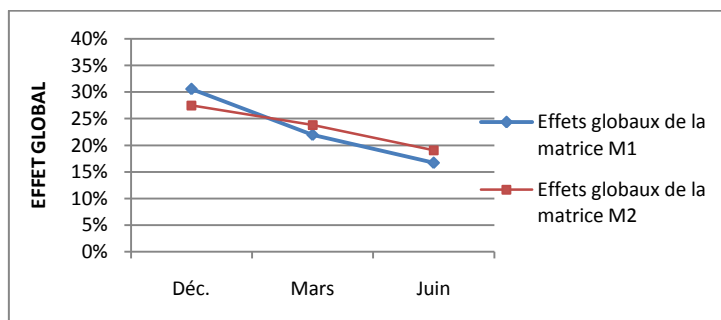


Figure 79 : L'effet de la variation saisonnière sur la contribution des toits à l'albédo effectif du modèle plot

Du mois de décembre au mois de juin, les valeurs subissent une baisse due au fait que le rayonnement solaire ne voit plus autant de surfaces de façades quand le soleil est élevé. Plus ce rayonnement est oblique, plus les surfaces de façades reçoivent de l'énergie directe, s'en suit une augmentation du flux réfléchi vers le ciel et les surfaces voisines.

d) L'effet des facteurs morphologiques (Annexe5)

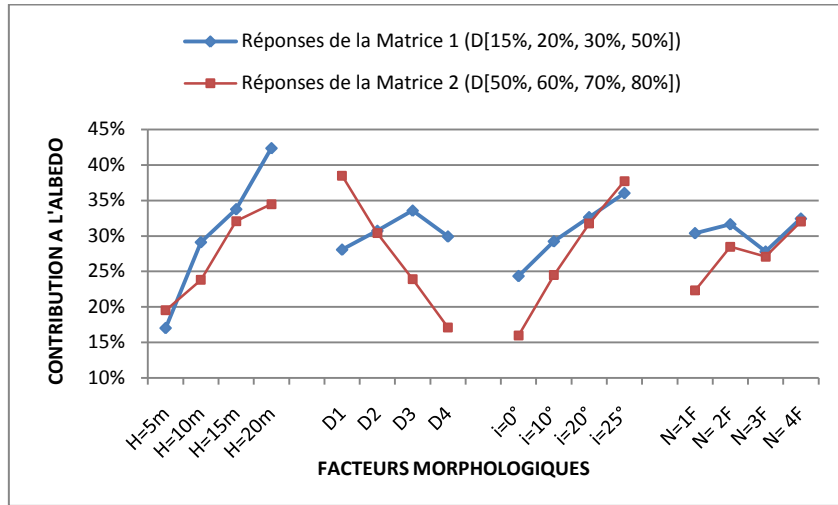


Figure 80 : L'effet des facteurs morphologique sur la contribution des façades à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.

▪ L'effet de la hauteur (H)

En considérant une seule date (le 21/12), nous constatons que la contribution des façades augmente avec la hauteur des bâtiments (fig80). Cette augmentation est un peu plus rapide que la densité est faible (comparer les deux pentes des deux courbes de tendances correspondant aux densités faibles et fortes). Cette tendance de la contribution des façades est due à l'augmentation de leur surface en fonction de la hauteur H, faisant accroître le flux incident et, entre autre, le flux réfléchi aussi bien vers les surfaces adjacentes que vers le ciel. En considérant les trois dates (le 21/03, 21/06 et le 21/12), nous obtenons une confirmation de l'effet saisonnier sur la contribution des façades : celle-ci est toujours d'autant plus élevée que la hauteur solaire est importante (fig81).

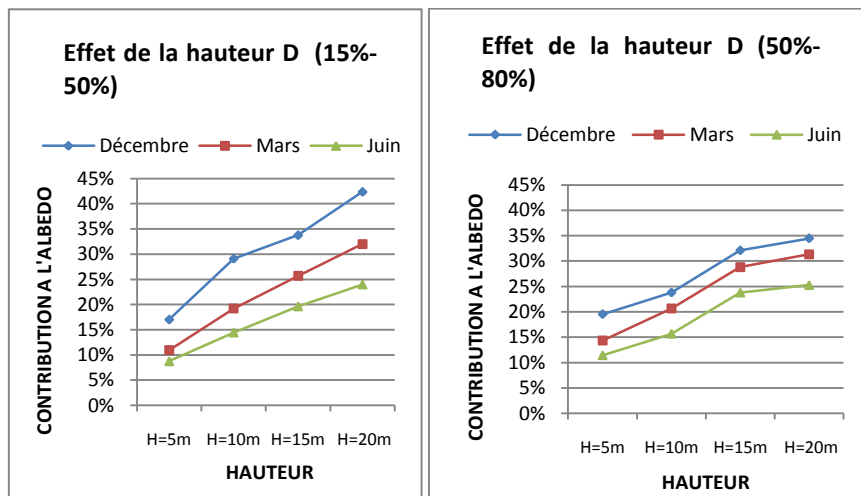


Figure 81 : L'effet de la hauteur des bâtiments sur la contribution des façades à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.

▪ ***L'effet de la densité (D)***

Il s'avère que la contribution des façades à l'albédo effectif au même titre que l'albédo lui-même, ne varie pas linéairement en fonction de la densité. Les contributions augmentent à partir de la densité 15% (supposée minimale) jusqu'à une densité 30%, puis baisse pour tendre vers 0 correspondant à une densité théorique maximale de 100% (fig40).

▪ ***L'effet de l'inclinaison des façades (facteurs I et N)***

La contribution de façades à l'albédo effectif augmente avec l'angle d'inclinaison : ce phénomène est d'autant plus important que la densité est forte (comparer les pentes de courbes de tendances correspondant aux deux matrices d'expériences M1 et M2). Considérant les nuages de points représentant l'effet du nombre (N) de façades inclinées, nous admettons que :

- Pour les densités faibles (<50%), la courbe de tendance de la contribution des façades s'apparente à un segment de droite horizontal suggérant une faible sensibilité au facteur (N).
- Pour les densités fortes (>50%), la courbe de tendance de la contribution des façades s'apparente à un segment de droite de sens ascendant suggérant une plus grande sensibilité au facteur (N).

Là encore, nous avons eu recours à des simulations classiques pour l'étalonnage des résultats. La figure (82) confirme le fait que la contribution des façades à l'albédo augmente avec l'angle d'inclinaison (I) :

- L'effet de l'inclinaison des façades est d'autant plus sensible que la densité est forte (écart de valeurs plus important)
- L'effet du nombre de façades inclinées s'estompe pour les densités faibles (rapprochement de courbes de l'effet du facteur N). la constance des valeurs de contribution des façades en fonction de (N) est révélée par la méthode de plan d'expérience.

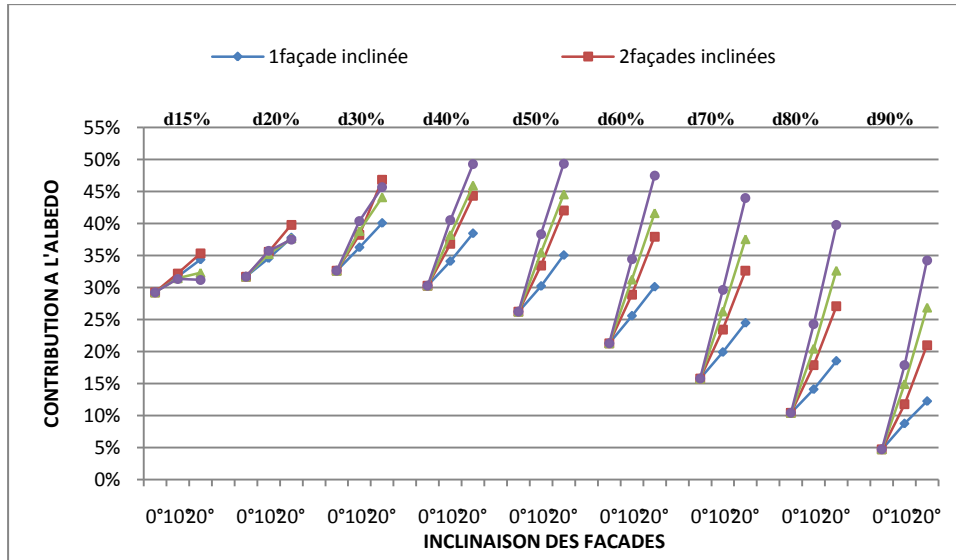


Figure 82 : L'effet de l'inclinaison des façades sur leur contribution à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.

V. STRATEGIE DES FORMES URBAINES

L'inclinaison des façades, au sein d'un tissu urbain de type plot, peut induire pour des densités inférieure à 30% une augmentation de l'albédo effectif. Au-delà de 30%, l'albédo diminue en fonction de l'angle d'inclinaison des façades, et cette diminution est d'autant plus rapide que la densité est forte. Par ailleurs, bien que l'emprise au sol du bâti soit conservée, l'inclinaison des parois réduit le volume des formes (la densité volumique n'est plus la même). Comme le volume habitable n'est plus le même, il vaudrait mieux éviter de comparer les formes de densité volumiques différentes. En fait, pour effectuer cette comparaison, deux géométries peuvent être modélisées (fig83).

- Une forme de même hauteur mais de densité surfacique inférieure de celle des formes inclinées.
- Une forme de hauteur inférieure mais de densité surfacique supérieure.

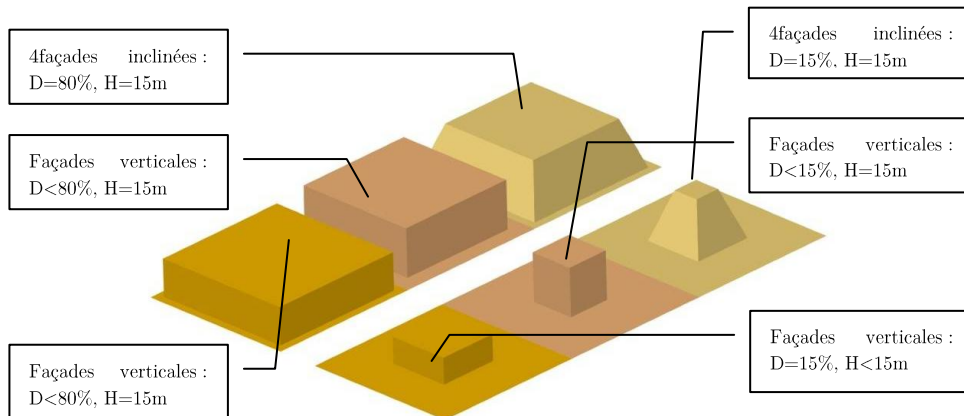


Figure 83 : Géométries de densité 15 et 80% (4 façades inclinées de 20°) avec pour chacune deux formes de densité volumique équivalente.

Nous avons effectué deux séries de simulations : la première porte sur des géométries de façades inclinées de 20°, de hauteur 15m et de densité 15%. La deuxième série porte sur des géométries de densité 80%. Dans les tableaux 30 et 31 sont consignées les valeurs d'albédo effectif correspondant à ces formes ainsi que les valeurs calculées pour des géométries de densité volumiques équivalentes :

Façades inclinées de 20°		Façades verticales	
N	Albédo D15% H15m	Albédo D<15% H15m	Albédo D15% H<15m
1F	31,80%	31,14%	31,86%
2F	32,00%	31,57%	32,97%
3F	32,90%	31,93%	33,85%
4F	33,40%	32,32%	34,73%

Tableau 30 : Calcul de l'albédo effectif pour des géométries de densité volumique identique, mais de densité surfacique et de hauteur différentes. La géométrie de référence étant de densité 15% et de hauteur 15m.

Façades inclinées de 20°		Façades verticales	
N	Albédo D80% H15m	Albédo D<80% H15m	Albédo D80% H<15m
1F	39,00%	39,03%	40,15%
2F	37,50%	37,98%	40,18%
3F	36,40%	37,02%	40,15%
4F	35,40%	36,20%	40,10%

Tableau 31 : Calcul de l'albédo effectif pour des géométries de densité volumique identique, mais de densité surfacique et de hauteur différente. La géométrie de référence étant de densité 80% et de hauteur 15m.

- Dans un contexte de forte densité (80%), les formes inclinées absorbent un peu plus d'énergie que les formes ayant les mêmes densités volumique et surfacique (le même volume habitable et la même emprise au sol mais de hauteur plus faible). Si l'on réduit l'emprise au sol (<80%) tout en gardant la même hauteur 15m, l'albédo reste constant.
- Pour les densités faibles (15%), l'albédo effectif d'une géométrie de façades inclinées demeure le même que celui des géométries de densité volumique équivalente

Même si l'on n'observe que de faibles différences entre les valeurs d'albédo des formes inclinées et verticales, ce que nous appelons « formes non standards » (avec des façades inclinées) permettent néanmoins de profiter davantage du soleil puisque l'angle d'incidence solaire sera plus normal aux parois des murs. Par ailleurs, les recherches antérieures ont déjà mis l'accent sur les bienfaits des enveloppes solaires dans l'accès solaire au tissu urbain. Enfin, comme le vecteur de la vitesse du vent est horizontal, les façades inclinées permettraient

d'avoir des configurations géométriques plus aérodynamiques, et d'enregistrer des valeurs de pressions plus faibles sur les parois des bâtiments.

D'autre part, si l'on aurait le choix, pour la même emprise au sol et le même volume habitable (dans un contexte urbain de forte densité tel que le notre aujourd'hui), entre les façades inclinées et verticales, nous recommandons d'opter pour l'inclinaison d'un nombre maximum de façades par bâtiment pour avoir un albédo minimum : L'écart de 5% que nous venons d'enregistrer au cours de nos expériences (tab31) aurait pu être plus important si la hauteur des modèles était plus grande et les matériaux de surfaces étaient hétérogènes. Les formes urbaines bénéficieront dans ce cas d'apports énergétiques plus importants, convoités durant les saisons froides et surtout pour les latitudes les plus élevées. Durant les saisons chaudes, nous pouvons remédier au problème de surchauffe en utilisant des matériaux réfléchissants en toitures, surtout que la surface de celles-ci est prépondérante (ce remède a été déjà avancé par AIDA lorsqu'il a proposé sa stratégie sus forme du ratio $W2/W1=0.5$).

VI. L'APPROCHE PHYSIQUE DU TISSU PLOT

1. Objectif et méthodologie (rappel)

Nous avons justifié dans le premier chapitre méthodologique le choix des matériaux urbain à attribuer aux quatre façades d'un bâtiment et aux sols qui leurs sont contiguës. Au total, nous disposons de huit surfaces de sols et de façades selon le critère de l'orientation, chacune est dotée de trois niveaux de réflectivité. Afin d'apporter plus de diversité au niveau de la géométrie urbaine, nous avons également fait varier la hauteur des bâtiments et la densité. Dans le tableau32 figurent les dix facteurs ainsi que leurs niveaux ou modalités.

		Réflectivité des façades				Réflectivité des sols				morphologie	
		fac_N	Faç-S	Faç-E	Faç-O	Sol-N	Sol-S	Sol-E	Sol-O	Hauteur	Densité
NIV.	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	10	10
	2	0,45	0,45	0,45	0,45	0,25	0,25	0,25	0,25	20	30
	3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,45	0,45	0,45	0,45	30	50

Tableau 32 : Les valeurs de réflectivité des façades et du sol servant à la constitution de la matrice d'expériences pour l'étude des matériaux urbains du tissu Plot.

Nous nous sommes limités à trois niveaux de densité et de hauteur car nous n'avons pas de matrices d'expériences disponibles avec autant de facteurs et de plus de trois niveaux. Parmi les matrices standards disponibles, celle qui s'adapte le mieux à notre situation est la matrice $L_{27} 3^{13}$ (matrice de 13 facteurs à 3 niveaux, avec 27 cas possibles : voire Annexe6)

Grâce au calcul des effets moyens des niveaux de réflectivités sur la réponse (l'albédo effectif), nous pouvons traduire les valeurs numériques en graphiques comme nous l'avons fait dans le chapitre précédent. La comparaison entre les courbes de tendance des effets des réflectivités des façades et sols nous permettra de mieux mesurer le poids des façades différemment orientées à l'absorption solaire.

Quelle orientation contribuerait le plus à l'absorption solaire ?

S'il s'avère que l'albédo effectif est plus sensible à la variation de la réflectivité de telle ou telle surface, alors, il serait possible d'avancer une stratégie de matériau en fonction de l'orientation, et ce selon les objectifs.

ESSAIS	Réflectivité des façades				Réflectivité du sol				dimensions	
	<i>Ref-fac-N</i>	<i>Ref-fac-S</i>	<i>Ref-fac-E</i>	<i>Ref-fac-O</i>	<i>Ref-sol-N</i>	<i>Ref-sol-S</i>	<i>Ref-sol-E</i>	<i>Ref-sol-O</i>	<i>H</i>	<i>D</i>
1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	10	10
2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,25	0,25	0,25	0,25	20	30
3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,45	0,45	0,45	0,45	30	50
4	0,1	0,45	0,45	0,45	0,05	0,05	0,05	0,25	20	30
5	0,1	0,45	0,45	0,45	0,25	0,25	0,25	0,45	30	50
6	0,1	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,05	10	10
7	0,1	0,8	0,8	0,8	0,05	0,05	0,05	0,45	30	50
8	0,1	0,8	0,8	0,8	0,25	0,25	0,25	0,05	10	10
9	0,1	0,8	0,8	0,8	0,45	0,45	0,45	0,25	20	30
10	0,45	0,1	0,45	0,8	0,05	0,25	0,45	0,05	20	50
11	0,45	0,1	0,45	0,8	0,25	0,45	0,05	0,25	30	10
12	0,45	0,1	0,45	0,8	0,45	0,05	0,25	0,45	10	30
13	0,45	0,45	0,8	0,1	0,05	0,25	0,45	0,25	30	10
14	0,45	0,45	0,8	0,1	0,25	0,45	0,05	0,45	10	30
15	0,45	0,45	0,8	0,1	0,45	0,05	0,25	0,05	20	50
16	0,45	0,8	0,1	0,45	0,05	0,25	0,45	0,45	10	30
17	0,45	0,8	0,1	0,45	0,25	0,45	0,05	0,05	20	50
18	0,45	0,8	0,1	0,45	0,45	0,05	0,25	0,25	30	10
19	0,8	0,1	0,8	0,45	0,05	0,45	0,25	0,05	30	30
20	0,8	0,1	0,8	0,45	0,25	0,05	0,45	0,25	10	50
21	0,8	0,1	0,8	0,45	0,45	0,25	0,05	0,45	20	10
22	0,8	0,45	0,1	0,8	0,05	0,45	0,25	0,25	10	50
23	0,8	0,45	0,1	0,8	0,25	0,05	0,45	0,45	20	10
24	0,8	0,45	0,1	0,8	0,45	0,25	0,05	0,05	30	30
25	0,8	0,8	0,45	0,1	0,05	0,45	0,25	0,45	20	10
26	0,8	0,8	0,45	0,1	0,25	0,05	0,45	0,05	30	30
27	0,8	0,8	0,45	0,1	0,45	0,25	0,05	0,25	10	50

Tableau 33 : La matrice d'expériences d'attribution des matériaux urbains aux surfaces des façades et du sol. Vingt sept combinaisons physiques au total (tissu Plot).

■ Combinaison de matériaux correspondant aux cas où l'albédo effectif ne subit qu'une faible fluctuation en fonction du cycle saisonnier.

CHAPITRE G. Analyse du Tissu de Type Plot

- Combinaison de matériaux correspondant aux cas où l'albédo effectif diminue avec la hauteur solaire
- Combinaison de matériaux correspondant aux cas où l'albédo effectif augmente avec la hauteur solaire

ESSAIS	Valeurs d'albédo effectif		
	21-déc.	21-mars	21-juin
1	6,67%	6,57%	6,51%
2	13,65%	14,15%	15,20%
3	17,40%	17,33%	17,96%
4	20,20%	18,41%	15,69%
5	24,47%	23,71%	21,94%
6	26,62%	27,54%	27,55%
7	33,55%	32,13%	27,42%
8	23,65%	20,95%	19,50%
9	35,05%	32,71%	29,53%
10	22,77%	22,61%	22,62%
11	15,66%	17,33%	18,83%
12	21,87%	22,11%	23,75%
13	21,06%	19,97%	17,94%
14	24,43%	24,25%	23,45%
15	24,61%	23,59%	21,56%
16	29,10%	25,52%	22,77%
17	27,70%	26,08%	22,90%
18	24,88%	19,86%	17,39%
19	19,17%	19,51%	20,37%
20	23,71%	23,41%	23,93%
21	19,14%	20,63%	22,82%
22	25,96%	25,28%	23,92%
23	23,64%	22,40%	21,90%
24	23,34%	21,46%	19,81%
25	28,54%	25,43%	22,28%
26	28,49%	24,95%	19,35%
27	29,06%	26,09%	24,15%

Tableau 34 : Les valeurs d'albédo effectif des vingt sept cas d'étude de la matrice d'expériences du modèle Plot.

2. L'effet de la densité et de la hauteur des bâtiments sur l'albédo

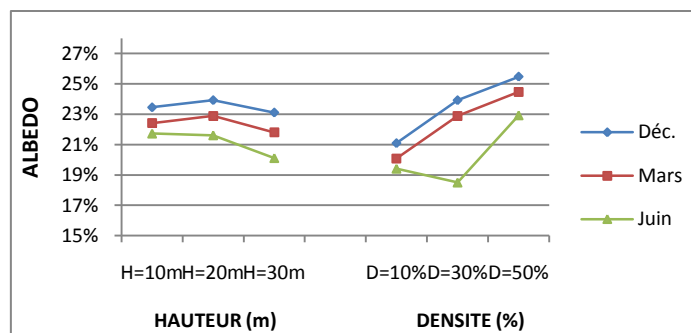


Figure 84 : Les effets de la hauteur de la canopée urbaine et de la densité surfacique sur la variation saisonnière de l'albédo effectif, pour un albédo de surface hétérogène.

A priori, les tendances de variation de l'albédo en fonction de la hauteur et de la densité n'obéissent à aucune logique évidente. Pour un albédo de surface hétérogène, la hauteur des bâtiments n'influe pas sur l'albédo. La densité, elle, n'affecte pas de la même façon l'albédo du mois de décembre, mars et juin.

Si nous comparons les valeurs d'albédo effectif correspondant à des géométries de même hauteur, nous allons nous rendre compte que les valeurs divergent beaucoup pour atteindre des écarts énormes de l'ordre de 18% (les cas de hauteur 30m) et 23% (cas de hauteur 10m). En fait, malgré les similitudes entre plusieurs géométries, les combinaisons matérielles sont tellement différentes que l'influence de la hauteur sur l'albédo s'estompe. Si nous évaluons l'effet de la hauteur en faisant une étude comparative de plusieurs villes en termes d'albédo effectif, il est très probable que les variations ne soient pas linéaires en fonction de la hauteur de la canopée urbaine, pour la même raison évoqué précédemment : l'influence des matériaux urbains est prépondérante face à la géométrie urbaine.

Le même phénomène peut justifier l'effet complexe de la densité : la courbe de l'effet moyen de la densité au mois de juin illustre une tendance fa miliare avec une déviation du sens de la variation au niveau de D30%. Les courbes correspondant au mois de décembre et mars manifestent une variation linéaire. Deux explications peuvent être avancées :

➤ Rappelons nous que AIDA conclut, en tenant compte des phénomènes diffus et spéculaires, que l'albédo est minimal pour une géométrie ayant un ratio ($W2/W1 = 0.5$) correspondant d'après notre calcul à une densité de 10%. Il est très probable qu'avec l'hétérogénéité des matériaux urbains, l'albédo effectif peut enregistrer une valeur minimale au niveau d'une densité autre que 30%.

➤ Nous avons déjà avancé qu'il existe un lien étroit entre la complexité de la tendance de l'albédo en fonction de la densité, et les façades dont les contributions au même albédo varient de manière inverse. La figure 84 confirme notre hypothèse : Seules les courbes des mois de décembre et mars ont été affectées par l'hétérogénéité des matériaux urbains, c'est-à-dire durant les périodes où les façades prennent du poids dans la réflexion solaire. Au mois de juin, la densité garde son influence (déviations au niveau de D30%) car l'influence des matériaux des façades s'estompe énormément quand l'angle d'incidence solaire est élevé

3. L'effet de la hauteur solaire sur l'albédo

Nous avons déjà constaté que la hauteur solaire ne présente aucun effet sur l'albédo effectif pour un albédo de surface homogène. Dans le cas où nous avons fait varier les matériaux de surface (tab 33), l'albédo effectif devient sensible à la variation de la course solaire. Les valeurs consignées dans le tableau 34 montrent des écarts saisonniers pouvant atteindre 10% et que même les tendances de variation peuvent différer : L'albédo peut demeurer constant, il peut augmenter avec la hauteur solaire et peut aussi diminuer selon les cas.

Il est possible de donner des explications aux phénomènes spécifiques qui se sont produits pour chacun des 27 cas, mais il est mieux approprié d'avancer les règles générales qui ont régi ces tendances diverses et de les regrouper sous trois catégories :

a) Cas où l'albédo est peu sensible à la course solaire

Nous enregistrons environ cinq cas dans la matrice où l'albédo effectif ne manifeste aucune sensibilité notable à la course solaire. Ces cas correspondent à des géométries et des combinaisons matérielles différentes mais qui obéissent à certaines règles :

➤ **(Cas 1 et 6)** : Quand la variation des matériaux urbains est quasiment nulle, même si l'une des surfaces urbaines (le sol, les toits ou des façades) prédomine, l'albédo de surface est considéré comme homogène.

Si l'on note une certaine hétérogénéité de matériaux urbains, plusieurs situations se présentent :

➤ **(Cas 19, 23)** : Pour une densité faible ($D=10\%$, 30%), quel que soit la hauteur H , l'albédo ne dépend que des façades et du sol (ces surfaces ont accès facile aux rayonnements quel que soit la saison) : comparer la réflectivité du sol avec les façades sud : il n'y a pas de variation saisonnière entre les valeurs d'albédo car les écarts sont faibles de l'ordre de 0.15.

➤ **(Cas 22)** : Pour une densité moyenne ($D=50\%$) et une hauteur faible ($H=10\text{m}$: faible pourcentage de surface de façades), s'orienter plutôt vers la

réflectivité du sol et des toits car leurs surfaces prédominent : la hauteur solaire n'a pas d'influence sur l'albédo effectif car celui-ci ne dépend que des surfaces planes.

➤ **(Cas10, 20)** : Pour une densité moyenne (50%) et une hauteur importante ($H=30\text{m}$: pourcentage de surface de façades élevé et certaine obstruction de la surface du sol), comparer la réflectivité des façades sud et des toits : l'albédo est faiblement sensible à la hauteur solaire du fait du faible écart enregistré (entre 0.1 et 0.2).

➤ **Le cas3** : A priori, la situation est complexe et il n'y a pas d'explication pour que l'albédo reste constant entre décembre et juin, car il un écart de 30% entre la réflectivité des surfaces planes et des façades verticales ($0.45 \neq 0.1$). Une hypothèse peut être avancée pour justifier ce phénomène. En fait, les façades ont accès relativement facile au soleil du fait de la densité moyenne du tissu urbain (50%). Malgré que l'angle d'incidence solaire soit élevé en été, les façades est et ouest peuvent intervenir pour réduire l'effet réfléchissant des surfaces du sol et des toits car elles bénéficient d'un taux d'exposition solaire diurne important (le soleil se lève et couche du côté nord).

➤ Pour une densité forte (80% par exemple), l'albédo ne varie pas en fonction de la hauteur solaire car il ne dépend que de la réflectivité des toits.

Nous avons admis dans nos interprétations que les façades nord n'influencent guère sur la variation saisonnière de l'albédo effectif, à l'exception des façades est et ouest qui peuvent intervenir dans certains cas, quand elles bénéficient d'un taux d'exposition solaire diurne important. Pour le moment, les résultats concordent avec ces hypothèses. Par ailleurs, nous avons remarqué que l'effet de certaines surfaces urbaines, qu'elles soient très réfléchissantes ou absorbantes, s'estompe en fonction du contexte urbain (densité et hauteur des constructions).

b) Cas où l'albédo augmente avec la hauteur solaire

➤ **(Cas2, 11, 12 et 21)** : Pour une densité faible (10% et 30%: prédominance du sol au dépend de la surface des toitures), l'albédo augmente avec la hauteur solaire si la réflectivité du sol excède celle des façades sud. Malgré que les valeurs de réflectivité des façades Est, Ouest et nord dépassent largement celle de la surface du sol (entre 0.45 et 0.8), la hausse des valeurs d'albédo a été lente et faible (1 à 3%), prouvant que ces orientations n'interviennent pas dans la variation de l'albédo.

c) Cas où l'albédo diminue avec la hauteur solaire

La situation la plus courante, d'après les valeurs consignées dans le tableau 23, est celle d'une régression des valeurs d'albédo en fonction de la hauteur solaire. La marge de réflectivité des surfaces du sol et des toits (0.05, 0.25, 0.3 et 0.45) est nettement inférieure à celle des façades (0.1, 0.45 et 0.8) : il y a donc plus de probabilité d'avoir des combinaisons qui font que les façades auront des réflectivités plus importantes que celles des surfaces planes. D'où les cas où l'albédo est plus élevée en décembre qu'en juin sont les plus courants.

Les régressions de valeurs d'albédo se manifestent quand il y a un écart entre la réflectivité des façades sud et celle des surfaces du sol et des toits, notamment pour les densités faibles.

- **(Cas 4 et 5)** : Les façades sud sont plus réfléchissantes que les surfaces horizontales. Les cas 4 et 5 manifestent des écarts respectifs de 0.35 et 0.1 en termes de réflectivité : L'albédo effectif diminue avec la hauteur solaire de 4.5% et 2.5%.
- **(Cas 7, 8 et 9)** : De même pour les cas 7, 8 et 9, les écarts sont respectivement de l'ordre de 0.65, 0.6 et 0.4. L'amplitude de la diminution de l'albédo entre décembre et juin est de 6%, 4% et 3.5%.
- **(Cas 18 et 26)** : Outre la faible densité urbaine, les cas qui ont connu une chute des valeurs d'albédo de plus de 7% sont caractérisés par la hauteur la plus élevée (30m) et une réflectivité des façades sud maximale (0.8). La faible réflectivité du sol (valeurs moyennes de 0.3 et 0.2) fait que l'albédo baisse de 7.5% et 9% du mois de décembre au juin.

d) Conclusion

D'après les valeurs consignées dans le tableau de réponse de la matrice d'expériences, les variations saisonnières suivent toutes l'hypothèse qui dit que : les façades nord, est et ouest n'interviennent pas dans la variation de l'albédo effectif durant les périodes de simulation choisies. Tout l'intérêt s'oriente vers les façades sud et les surfaces du sol et des toits. Nous avons besoin de confirmer ces hypothèses par l'étude de l'impact des matériaux de chacune des orientations de façades sur la tendance de variation de l'albédo effectif.

4. La sensibilité de l'albédo à la variation des matériaux des façades

Comme nous venons de voir dans le tableau 23, les valeurs d'albédo effectif diminuent le plus souvent entre le mois de décembre et juin (situation plus courante). C'est la raison pour laquelle la figure 85 manifeste le plus souvent des valeurs plus élevées en décembre. Le graphique ne manifeste pas toutes les tendances saisonnières, mais donne une appréciation globale sur ce qui pourrait le plus souvent advenir dans le contexte réel urbain. Nous avons déjà expliqué le phénomène par le fait que les façades prennent des valeurs de réflectivité le plus souvent supérieures à celles des surfaces du sol et des toits (voire base de données de matériaux urbains).

Les courbes de variation de la sensibilité de l'albédo effectif (les calculs des effets moyens des niveaux de réflectivité sont dans l'annexe 7) confirment les hypothèses émises précédemment. La marge de valeurs d'albédo est plus grande si la réflectivité des façades sud est touchée. Quand on manipule la réflectivité des autres façades, les variations sont beaucoup moins rapides. La sensibilité de l'albédo effectif aux matériaux de façades dépend fortement de l'orientation des façades elles mêmes.

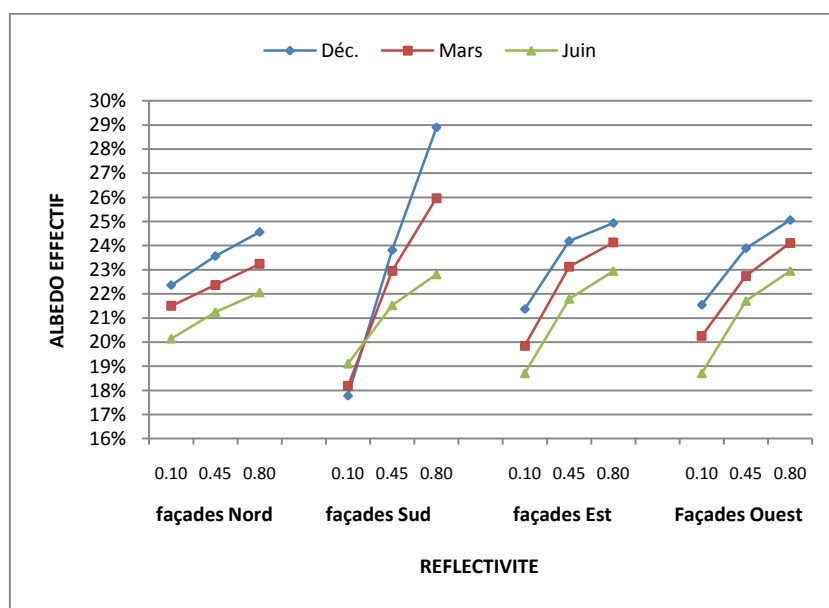


Figure 85 : L'effet de la réflectivité des façades N, S, E et O sur la variation de l'albédo effectif du tissu plot.

Nous pouvons noter trois allures de courbes différentes : Les courbes les plus douces (influence faible) correspondent aux courbes saisonnières des façades nord. Les courbes de pentes moyennes (influence modeste) correspondent aux façades est et ouest. Enfin, les courbes de pentes fortes (forte influence) sont celles des façades sud. Ces trois allures permettent de statuer sur le poids des

façades différemment orientées dans la variation de l'albédo effectif en fonction des matériaux.

Il est à noter que le comportement des façades sud, est et ouest est très proche durant le mois de juin. À cause de l'importance de la hauteur solaire, le pouvoir réfléchif des façades s'estompe pour laisser place aux surfaces planes (le sol et les toits). Nous essaierons ultérieurement de justifier encore plus ce comportement.

Nous tenons à rappeler qu'il n'existe pas une tendance saisonnière unique de variation de l'albédo. La figure manifeste la tendance la plus courante dans le tableau des réponses, une régression des valeurs d'albédo avec la hauteur solaire. Néanmoins, nous pouvons relever une situation où l'albédo augmente au mois de juin (voire les courbes correspondant aux façades sud).

5. La sensibilité de l'albédo à la variation des matériaux du sol

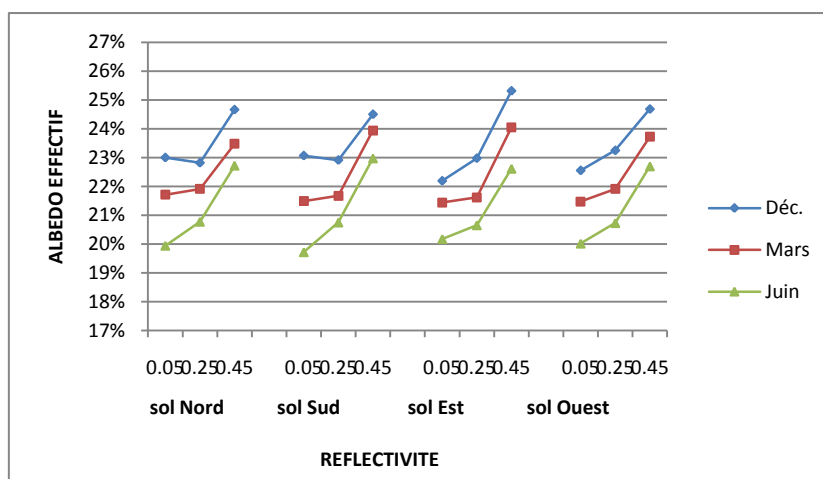


Figure 86 : L'effet de la réflectivité du sol sur la variation de l'albédo effectif du tissu plot.

Au même titre que le graphique43, la figure85 illustre une seule tendance de variation, celle où l'albédo est plus élevé en décembre qu'en mars ou juin : une situation qui n'est pas représentative de tous le cas de la matrice mais qui informe sur ce qui est susceptible d'advenir le plus couramment dans le milieu urbain. Ce qui nous intéresse de la figure n'est pas donc la variation saisonnière, mais le poids des surfaces de sol orientées N, S, E et O sur la variation de l'albédo effectif à travers la comparaison des courbes de chaque date entre elles.

Les courbes de tendances correspondant aux effets respectifs des facettes de sols nord, sud, est et ouest montrent que l'albédo effectif fluctue de la même manière. A priori, l'orientation du sol n'influe pas sur la variation saisonnière de l'albédo effectif.

➤ Pour le mois de Juin, la variation de l'albédo en fonction de la réflectivité est parfaitement linéaire. Durant cette période le sol voit beaucoup plus le soleil, pourvu que la densité soit moyenne ou faible et que la hauteur ne constitue pas un front bâti au sol.

➤ Pour le mois de décembre et mars, l'albédo a plus tendance à varier à partir de la valeur de réflectivité 0.25 (une variation plus rapide)

Nous admettons qu'aucune stratégie particulière d'attribution de matériaux ne peut se présenter concernant le sol.

6. Les contributions des façades à l'absorption (Annexe8)

Nous procédons à la mesure de la contribution des façades dans le tissu urbain. Cette étude lèvera le doute sur les lieux de piégeage solaire en montrant le ou les expositions solaires qui sont derrière l'absorption accrue des façades. Dans le tableau36 sont consignées les valeurs moyennes de contributions de chacune des façades (N, S, E et O) en fonction des niveaux de réflectivité 0.10, 0.45 et 0.80.

Remarque : Il faut signaler que, dans Solène, il arrive que nous ayons des valeurs de flux réfléchi, rapporté à la surface de façades nord, qui dépassent légèrement la quantité de flux global incident. C'est la raison pour laquelle figurent parmi nos calculs un nombre très réduit de valeurs d'absorption négatives (tableau35).

FACADES	REFLECTIVITE	Déc.	mars	juin
Façades Nord	0,1	3,44%	2,89%	12,12%
	0,45	1,20%	0,74%	8,25%
	0,8	-1,00%	-1,46%	5,49%
Façades Sud	0,1	67,29%	57,33%	31,51%
	0,45	63,28%	52,54%	26,03%
	0,8	60,08%	48,66%	21,60%
Façades Est	0,1	21,00%	27,41%	38,00%
	0,45	17,57%	23,20%	32,77%
	0,8	13,57%	18,35%	26,61%
Façades Ouest	0,1	21,79%	28,10%	38,51%
	0,45	17,94%	23,40%	32,92%
	0,8	14,21%	18,85%	27,07%

Tableau 35 : L'effet moyen de la réflectivité des façades sur leurs contributions à l'absorption solaire

a) Les contributions saisonnières

Le calcul de la moyenne des 27 cas pour chaque date de simulation permet de tracer les courbes de variation des contributions saisonnières des quatre façades. La figure 86 permet de constater que la contribution des façades sud varie de manière plus rapide que les autres façades en fonction de la hauteur solaire (comparer les pentes des courbes). Quant au sens de cette variation, la baisse de la contribution des façades sud est due au fait qu'elles bénéficient d'un taux d'exposition solaire diurne moins important en juin qu'en décembre. Pour les façades nord, est et ouest, leurs contributions à l'absorption augmentent avec la hauteur solaire puisqu'elles ont un taux d'exposition solaire plus élevée au mois de juin qu'en décembre

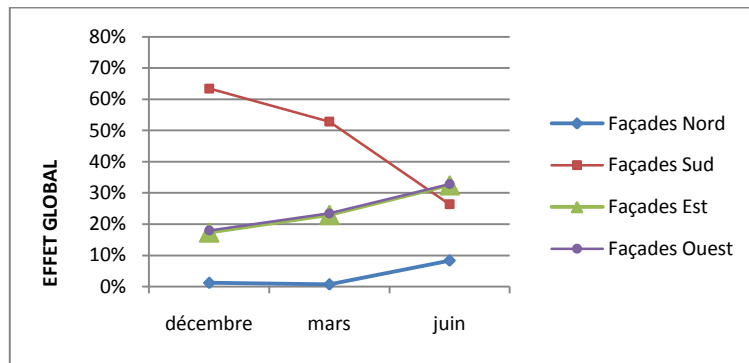


Figure 87 : La variation saisonnière des contributions des façades N, S, E et O à l'albédo effectif (tissue plot).

b) L'effet des matériaux des façades

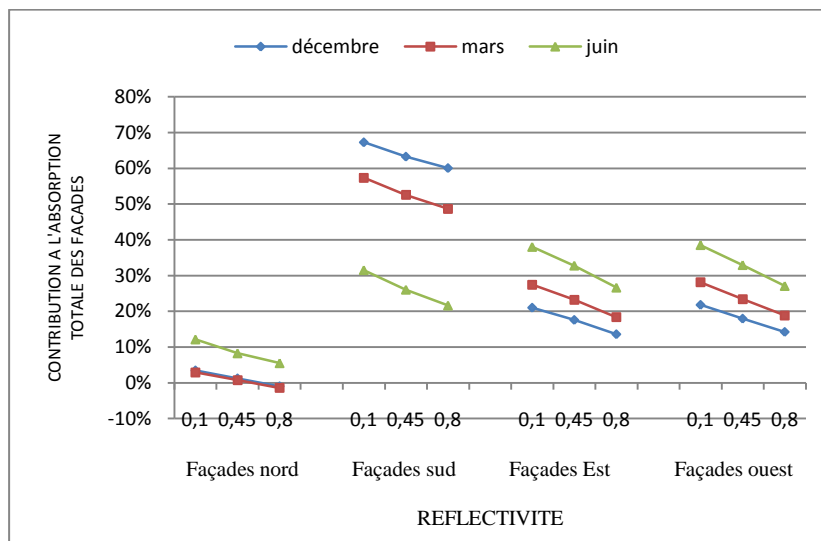


Figure 88 : L'effet de la réflectivité des façades sur leurs contributions à l'absorption de la totalité des façades (tissue plot).

Le calcul des contributions confirme le poids des orientations sud dans l'absorption solaire par rapport au reste des façades (fig.87) :

- L'absorption des façades sud, au mois de décembre et mars, se trouve dans la marge de 50-70%. Durant le mois de juin, la contribution baisse et se trouve dans la marge de 20-30% (il faut faire attention que les valeurs de contributions de la figure sont des valeurs moyennes qui permettent d'apprécier l'importance de l'absorption solaire).
- Les orientations Est et Ouest contribuent modestement à l'absorption totale des façades, notamment au mois de décembre et mars (20-30%). En juin, elles peuvent participer à l'absorption de plus d'énergie que les façades sud (25-40%).
- Les contributions minimales proviennent des orientations nord : les moyennes de valeurs, calculées à partir des 27 cas d'étude, sont comprises entre 0 et 10%.

VII. STRATEGIE D'ATTRIBUTION DES MATERIAUX URBAINS

En regard des combinaisons matérielles et morphologiques de la matrice d'expériences, les valeurs saisonnières d'albédo consignées dans le tableau des réponses nous ont permis d'émettre quelques hypothèses afin de justifier les phénomènes qui se sont déroulés. Les résultats (27 cas) concordent avec le fait que les façades nord présentent une influence faible sur l'albédo, les façades est et ouest peuvent avoir du poids durant les saisons chaudes, et les façades sud interviennent avec beaucoup plus de poids durant l'hiver. Les surfaces planes (sol et toits), elles, interviennent quand la hauteur solaire est élevée (angle d'incidence solaire fort).

Les courbes des effets moyens des matériaux de façades nord, sud, est et ouest ont confirmées les hypothèses concernant le poids des façades différemment orientées. Nous avons pu avoir une idée encore plus approfondie sur les phénomènes grâce à l'étude des contributions de chacune à l'absorption solaire. Nous disposons désormais d'une classification des orientations en fonction du critère du piégeage solaire (contribution à l'absorption):

- ***Pour les mois de décembre et mars*** : (1) Les façades sud, (2) les façades est et ouest et (3) les façades nord.
- ***Pour le mois de juin*** : (1) les façades est et ouest, (2) les façades sud et (3) les façades nord.

1. Les façades sud

Dans la mesure où les gains énergétiques sont convoités l'hiver (besoins de chauffage...), les façades sud se présentent comme des outils stratégiques favorables. Comme l'absorption de la forme urbaine croît rapidement en fonction de la réflectivité des orientations sud, il est recommandable d'avoir des matériaux absorbants. L'été, ces matériaux n'auront pas le même poids au mois de juin, leurs effets s'estompent. Durant la saison d'été, il n'y aura pas autant de surchauffe due à l'absorption des mêmes matériaux. Les pentes des courbes d'effet saisonnier de la réflectivité des façades sud sur l'albédo effectif, sont de plus en plus douces du mois de décembre au mois de juin, en passant par mars.

2. Les façades est et ouest

Elles présentent une influence modeste sur la variation de l'albédo effectif au cours des saisons d'hiver et de printemps. En été, malgré que leurs contributions à l'absorption soient inférieures à celles du mois de décembre et mars, elles constituent les lieux de captage solaire estival les plus importants parmi l'ensemble des façades. Nous recommandons alors que leurs matériaux soient réfléchissants.

3. Les façades nord

Les façades nord influencent très faiblement la variation de l'albédo effectif durant le cycle saisonnier. D'une part, leur pente d'effet sur l'albédo effectif (en fonction des matériaux) est la plus douce. D'autre part, leurs contributions à l'absorption de l'ensemble des façades urbaines sont infimes. Les matériaux des façades nord jouent un rôle négligeable dans le phénomène de piégeage solaire, ce qui nous laisse indifférent face à leurs propriétés optiques.

4. Le sol et les toits

Que ce soit dans les tissus très denses ($>70\%$) ou très faibles ($<30\%$), ce qui contribue à la réduction de l'albédo effectif en été ne sont pas les façades mais les surfaces planes qui prennent du poids quand l'angle d'incidence solaire est fort. Nous avons vu que leurs faibles réflectivités (en regard de celles des façades), se trouvant dans la marge (0.05-0.45), est à l'origine de cette baisse rapide des valeurs estivales d'albédo. Il est conseillé que les matériaux de surface du sol et des toits soient réfléchissants.

Le phénomène d'îlot de chaleur concerne beaucoup plus les villes de densité moyennes et fortes ($>50\%$), de hauteur de bâtiments importantes ($>20\text{m}$). Nous pensons, d'une part, qu'une distribution aléatoire des hauteurs des

constructions peut être favorable aux gains solaires hivernaux (grâce aux inter-réflexions entre les toits et les murs adjacents). Des surfaces de toitures réfléchissantes permettent d'accentuer ce phénomène. D'autre part, malgré que la surface du sol soit d'autant plus réduite que la densité est forte, il vaudrait mieux avoir des revêtements réfléchissants notamment dans les endroits dégagés (grands boulevards, rues larges, places...) pour avoir des valeurs estivales d'albédo faibles. Afin d'avoir un cycle d'absorption urbaine qui s'inverse en fonction des caractéristiques saisonnière, la solution qui se présente consiste en l'attribution aux façades sud des matériaux absorbants (gains hivernaux) et aux façades est et ouest des revêtements réfléchissants pour éviter l'ascension rapide des gains estivaux.

5. Les remèdes à certains cas de la matrice

Après toutes ces analyses, il est possible de revenir sur certains cas simulés et proposer pour chacun des solutions afin de réduire les gains estivaux et favoriser ceux d'hiver. Il existe plusieurs remèdes qu'il en existe de situations spécifiques. Les cas 1 et 9 correspondent aux situations extrêmes où l'albédo effectif est soit minime soit maximal. D'autres cas sont abordés du fait des écarts saisonniers d'albédo qui dépassent 5% (cas N°17, 26 et 27).

▪ *Les albedos d'hiver et d'été les plus élevés*

La forme urbaine la plus réfléchissante est celle correspondant à la combinaison matérielle et géométrique N°9. De densité faible 30% et de hauteur $H=20m$, la surface urbaine réfléchi en hivers 35.05% des flux vers le ciel et 29.5% en été à cause des niveaux de réflectivité maximaux des façades et du sol (0.8 et 0.45). On aurait pu privilégier plus d'absorption l'hiver en attribuant aux façades sud un matériau de réflectivité 0.1. L'écart entre les valeurs d'albedos saisonniers s'estompera dans ce cas.

▪ *Les albedos d'été et d'hiver minimes*

La forme la plus absorbante correspond au cas N°1 de la matrice. L'albédo effectif est de 6% durant les trois saisons du printemps, d'été et d'hiver. La géométrie urbaine présente les matériaux les plus absorbants au niveau du sol et des façades (0.05 et 0.1). Malgré que le tissu soit peu dense (10%) et de hauteur faible (10m), le piégeage solaire est dû aux matériaux de surface. en fait, même si l'on remédie à la situation en été par des revêtements réfléchissants au sol, l'hiver va aussi connaître un albédo élevé car la surface du sol prédomine devant les façades. De toute façon le tissu ne va connaître des soucis de surchauffes car le contexte s'apparente à celui des paysages campagnards de densité très faible (tissu bien aéré...).

▪ *Les plus grands écarts enregistrés entre les valeurs d'albédo saisonnières*

Nous tenons à analyser les géométries de densité 50% car ce qui nous intéresse le plus c'est de minimiser les contributions de l'albédo effectif à l'ilot de chaleur dans les villes actuelles de densité moyenne et fortes.

➤ L'albédo de la géométrie 17 (D=50%) régresse d'environ 5% entre le mois de décembre et juin. Nous souhaitons inverser la situation pour correspondre aux caractéristiques saisonnières. Nous conseillons d'avoir des façades sud absorbantes (réflectivité 0.1), des façades est et ouest plus réfléchissantes (0.8) et un revêtement au sol de réflectivité uniforme de 0.45.

➤ La géométrie N°26 de densité 50% manifeste un écart de 9% entre l'hiver (28.5%) et l'été (19.35%). Nous recommandons l'attribution d'un matériau absorbant aux façades sud (de réflectivité 0.1 au lieu de 0.8) pour diminuer l'albédo en hiver. Pour que les façades est et ouest aient du poids dans l'augmentation de l'albédo en été, il est conseillé d'élever leur réflectivité à 0.8.

➤ La géométrie N°27 de densité 50% présente un albédo plus élevé en hiver qu'en été (29.06% et 24.15%). Les réflectivités moyennes du sol (0.2) et des façades est et ouest (0.25) sont faibles. Pour accroître l'albédo en été, nous recommandons un matériau plus réfléchissant au niveau du sol (0.45), des toits et des orientations est et ouest (0.8). L'albédo subira une régression rapide l'hiver si l'on attribue un matériau plus absorbant aux orientations sud (0.1).

H. ANALYSE DU TISSU DE TYPE CANYON

I. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

Pour l'étude du tissu canyon, nous avons rencontré des difficultés de modélisation de certaines formes à cause de la contrainte d'inclinaison des façades. Le problème se pose surtout pour les géométries de faible densité. Pour disposer d'une plage de manœuvre de l'angle d'inclinaison de 0° à 25° il ne faut pas dépasser un niveau de hauteur.

En fait, nous avons tenté les mêmes facteurs et niveaux que ceux du tissu Plot et avons constaté que seule une matrice dont les niveaux de densité varient entre 50% et 80% peuvent être employées pour l'étude des niveaux de hauteur 5, 10, 15 et 20m et d'angle d'inclinaison 0° , 10° , 20° et 25° . Nous allons disposer d'informations incomplètes sur l'effet de la densité et les autres facteurs qui seront évalués uniquement pour une plage de densité réduite (50%-80%).

Par ailleurs, la deuxième matrice qui aurait pu être établie à partir des valeurs de densité 15%-50% donne une combinaison géométrique qui ne peut être modélisée (essai n°6 : pour une densité 15% et une inclinaison de façades de 25° , nous aurons une forme prismatique sans surface de toiture et sans pouvoir atteindre la hauteur de 10m souhaitée) et une deuxième géométrie avec une surface de toitures presque nulle (essai16, tab36).

Essais	modèle	H (m)	D (%)	I ($^\circ$)
1	BILAT	5	15	0
2	BILAT	10	20	10
3	BILAT	15	30	20
4	BILAT	20	50	25
5	BILAT	5	20	20
6	BILAT	10	15	25
7	BILAT	15	50	0
8	BILAT	20	30	10
9	UNILAT	5	30	25
10	UNILAT	10	50	20
11	UNILAT	15	15	10
12	UNILAT	20	20	0
13	UNILAT	5	50	10
14	UNILAT	10	30	0
15	UNILAT	15	20	25
16	UNILAT	20	15	20

Tableau 36 : Matrice d'expériences pour l'étude de l'effet des facteurs morphologiques sur l'albédo effectif. Marge de densité 15-50% (tissu canyon).

Même si nous avons pu contourner ce problème en commençant par le niveau de densité 20%, ou bien choisir un élément de trame urbaine de dimension 100*100m, nous estimons qu'il est plus utile de passer directement à l'étude de l'inclinaison des façades et des matériaux urbains des tissus canyons nord-sud et est-ouest, d'autant plus que nous avons été obligé, pour le tissu Plot, d'avoir recours à la méthode classique de simulations pour l'étude de l'effet du facteur d'inclinaison des façades. Pour toutes ces raisons, nous allons nous passer de la méthode de plan d'expériences pour l'étude de la forme urbaine (Hauteur, Densité, Inclinaison et Nombre de façades inclinées).

- Grâce à la méthode classique, nous évaluerons l'effet de l'inclinaison des façades bordant les rues canyons NS et EO. En faisant varier la densité urbaine, nous expliciterons mieux les tendances de variation de l'albédo effectif en fonction du facteur d'inclinaison.
- Quant à l'étude de la réflectivité de matériaux, nous allons recourir à la méthode de plan d'expériences pour déterminer les différentes combinaisons matérielles à simuler.

II. L'EFFET DE L'INCLINAISON DES FAÇADES

En procédant de la même manière que pour le tissu Plot, nous avons fait varier l'angle d'inclinaison des façades de deux rues canyon NS et EO, et ce pour chaque niveau de densité. Les valeurs d'albédo effectif sont consignées dans un tableau puis traduites graphiquement sous forme de courbes de tendance. Il s'agit d'une série de simulations classiques dont on a essayé de réduire le nombre de cas en ne faisant varier que la densité et l'angle d'inclinaison sans pour autant faire varier la hauteur des bâtiment (La hauteur de la canopée urbaine est maintenue constante de 15m).

1. Etude du Canyon Est-Ouest

a) L'inclinaison des façades sud

La figure88 montre que l'albédo effectif croit de manière linéaire avec la densité urbaine, et ce quel que soit l'angle d'inclinaison (Les valeurs sont consignées dans l'annexe9).

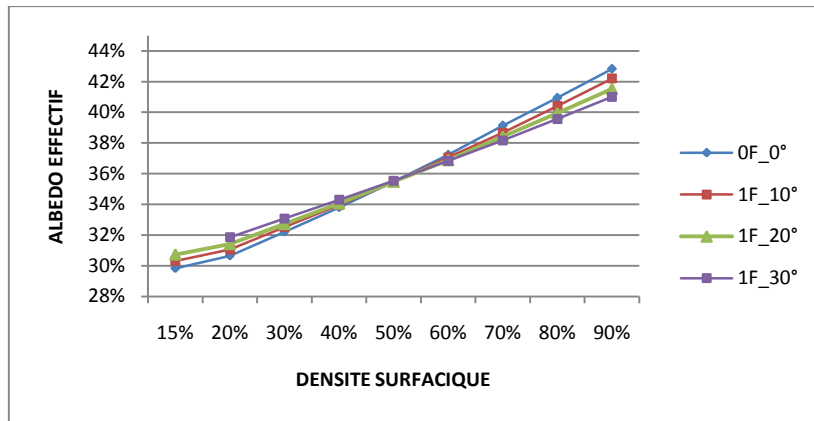


Figure 89 : L'effet de l'inclinaison des façades sud du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif le 21/12, en fonction de la densité (H=15m).

La variation s'avère complexe en fonction de la densité : Alors que nous nous attendions à ce que l'inclinaison de la façade sud diminuerait l'albédo effectif, nous sommes confronté plutôt à un phénomène assez complexe :

- Entre la densité 15 et 50%, l'albédo effectif augmente avec l'inclinaison de la façade en question.
- Au niveau de la densité 50%, les courbes de tendance de l'albédo se croisent : l'inclinaison de la façade sud ne présente aucun effet.
- Au-delà de la densité deuil 50%, la situation s'inverse et l'albédo croit avec l'inclinaison de la façade sud.

Nous essaierons de trouver une explication à ce phénomène plus tard, lors de l'étude des contributions des surfaces urbaines du canyon à l'albédo effectif.

b) L'inclinaison des façades nord

L'albédo effectif décroît linéairement, avec des écarts constants, en fonction de l'angle d'inclinaison des façades nord du canyon EO. (Fig.89). les valeurs numériques sont consignées dans l'annexe10.

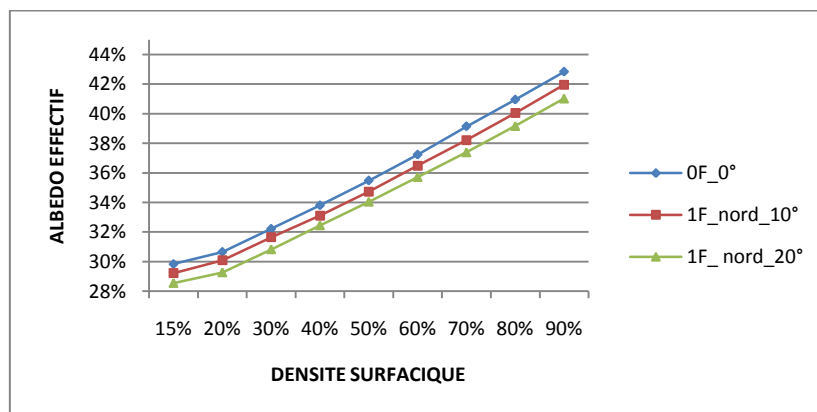


Figure 90 : L'effet de l'inclinaison des façades nord du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité (H=15m).

c) L'effet de l'inclinaison des façades nord et sud

Les façades nord et sud agissent conjointement, en fonction de leur inclinaison, pour donner une troisième tendance de variation de l'albédo urbain : La figure 90 n'est que la résultante des deux courbes précédentes: L'albédo effectif augmente en fonction de l'angle d'inclinaison, pourvu que la variation des inclinaisons des deux façades nord et sud soient les mêmes. Il s'agit d'un phénomène de compensation de valeurs d'albédo qui a fait que l'effet de l'inclinaison est nul pour la densité minimale 15%, et qu'au niveau de la densité 50% l'albédo n'est plus constant mais varie en diminuant en fonction de (I). (Les valeurs numériques sont consignées dans l'annexe 11).

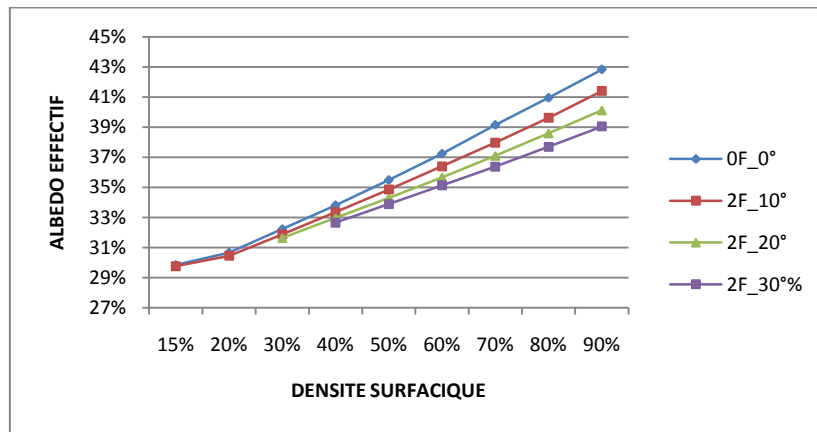


Figure 91 : L'effet de l'inclinaison des façades nord et sud du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif le 21/12, pour des valeurs de densité différentes (H=15m).

2. Etude du Canyon Nord-Sud

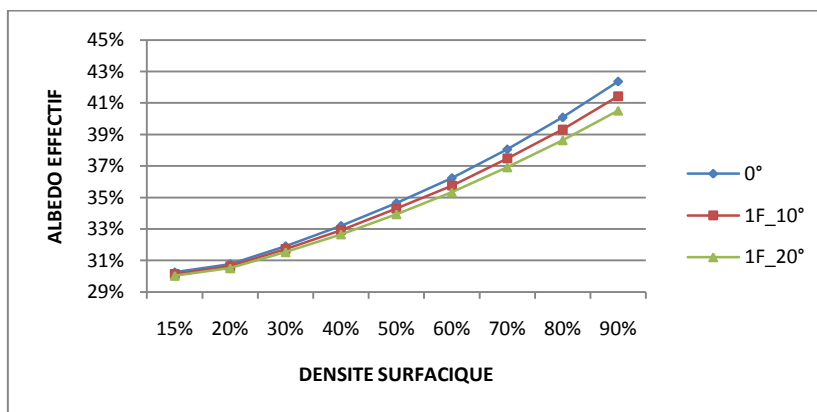


Figure 92 : L'effet de l'inclinaison des façades est du canyon NS sur la variation de l'albédo effectif le 21/12, pour différentes valeurs de densités (H=15m).

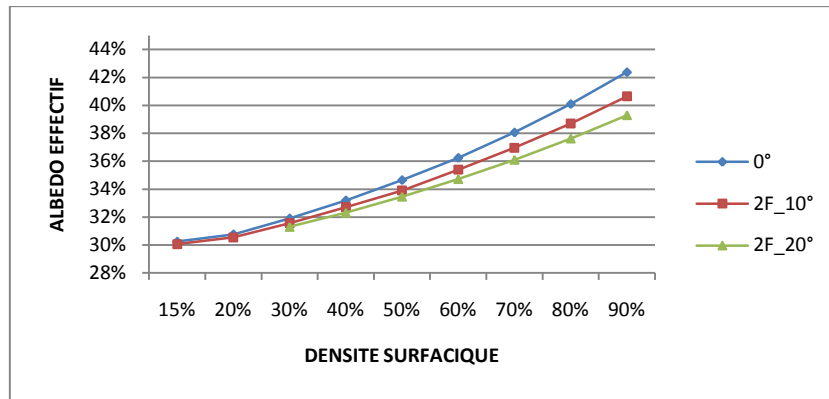


Figure 93 : L'effet de l'inclinaison des façades est et ouest du canyon NS sur la variation de l'albédo effectif le 21/12, pour différentes valeurs de densité ($H=15m$).

L'albédo effectif augmente avec l'inclinaison de la façade est. Cette variation est d'autant plus importante que la densité est forte (fig.91). Par ailleurs, la courbe de tendance correspondant à l'effet de l'inclinaison simultanée des deux façades est et ouest (fig.92) garde le même profil avec des écarts deux fois plus importants que dans le cas de l'affectation d'une seule façade (Les valeurs numériques sont consignées dans les annexes 12 et 13). Nous pouvons conclure alors que les façades est et ouest agissent de la même manière sur l'albédo sous l'effet de l'inclinaison. Cette variation de l'albédo est deux fois plus rapide dans le cas de l'inclinaison des deux façades.

III. LES CONTRIBUTIONS DES SURFACES URBAINES A L'ALBEDO EFFECTIF

1. Etude du Canyon EO

a) L'effet de la densité sur les contributions

Densité	contrib-sol	contrib-toit	contrib-fac	Albédo effectif
15%	21,92%	22,52%	55,56%	29,84%
20%	18,13%	29,36%	52,52%	30,66%
30%	13,36%	41,68%	44,96%	32,22%
40%	9,49%	52,84%	37,67%	33,80%
50%	6,20%	63,11%	30,70%	35,48%
60%	3,58%	72,36%	24,07%	37,23%
70%	1,66%	80,52%	17,82%	39,14%
80%	0,51%	87,95%	11,54%	40,94%
90%	0,06%	94,14%	5,80%	42,83%

Tableau 37 : Les contributions des surfaces urbaines du canyon EO à l'albédo effectif le 21/12, en fonction de la densité urbaine ($H=15m$).

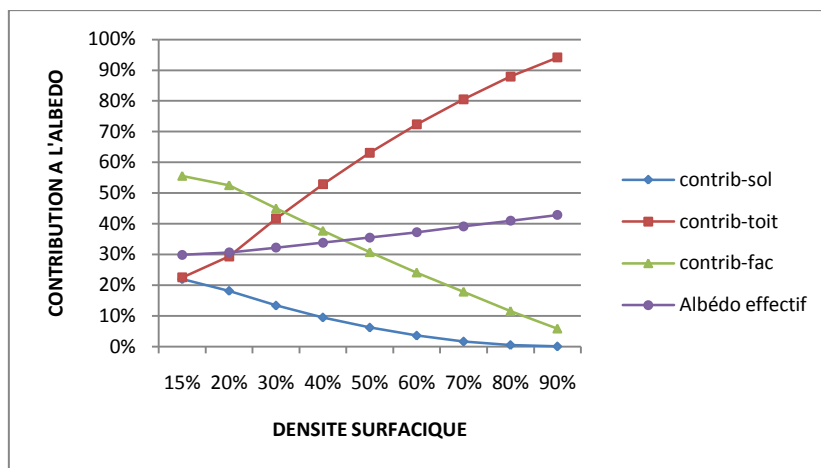


Figure 94 : Les tendances de contribution des surfaces urbaines du canyon EO à l'albédo effectif le 21/12, en fonction de la densité urbaine (H=15m).

Nous constatons certaines différences entre les profils de tendance de contributions des surfaces urbaines respectives du tissu Plot et Canyon. Nous rappelons que l'étude se réfère à des géométries dotées de façades verticales et de hauteur fixe de 15 m (fig.93).

- **Les façades**

La tendance de variation de la contribution des façades à l'albédo effectif est parfaitement linéaire. Une droite descendante caractérise cette variation : les façades du tissu canyon EO contribuent de moins en moins à l'albédo pour atteindre des valeurs très faible (proche de 0%) au-delà de la densité 80%. Pour le tissu Plot, nous savons déjà qu'il existe une déviation au niveau de laquelle il y a inversion de la tendance de contribution des façades (au niveau de la densité 20-30%)

- **Le sol et les toits**

Les profils de variation de contributions du sol et des toits présentent les mêmes aspects que dans le cas du tissu Plot : la contribution des toits croit rapidement avec la densité alors que celle du sol décroît de manière progressive. La seule différence qui distingue le tissu Plot du canyon est que pour ce dernier les contributions du sol et des toits se croisent au niveau de la densité supposée être la plus faible 15%.

Il devient de plus en plus clair que la différence des profils de variation de l'albédo effectif dans les deux contextes de formes urbaines (Plot et Canyon) est due aux différents comportements des façades des deux tissus.

b) L'effet de l'inclinaison des façades sur les contributions

▪ *Les contributions des toits (fig.94)*

La figure 94 montre bien que la contribution des surfaces de toitures à l'albédo effectif diminue en fonction de l'angle d'inclinaison des façades mais également du nombre de façades inclinées dans le canyon. Il est aussi à noter que les façades nord et sud présentent le même poids dans la contribution des toits. En effet, les courbes relatives à l'affectation des deux façades se superposent parfaitement, et l'effet l'inclinaison de 10° des façades nord et sud équivaut à l'effet de l'inclinaison d'une seule façade de 20°.

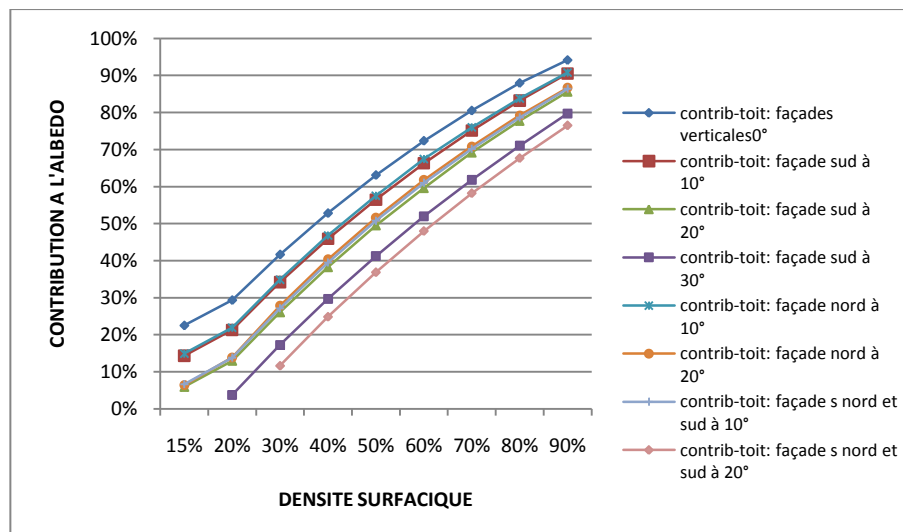


Figure 95 : Les tendances de contribution des toits du canyon EO à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité urbaine, pour différents angles d'inclinaison des façades nord et sud. (H=15m).

▪ *Les contributions des façades (fig.95)*

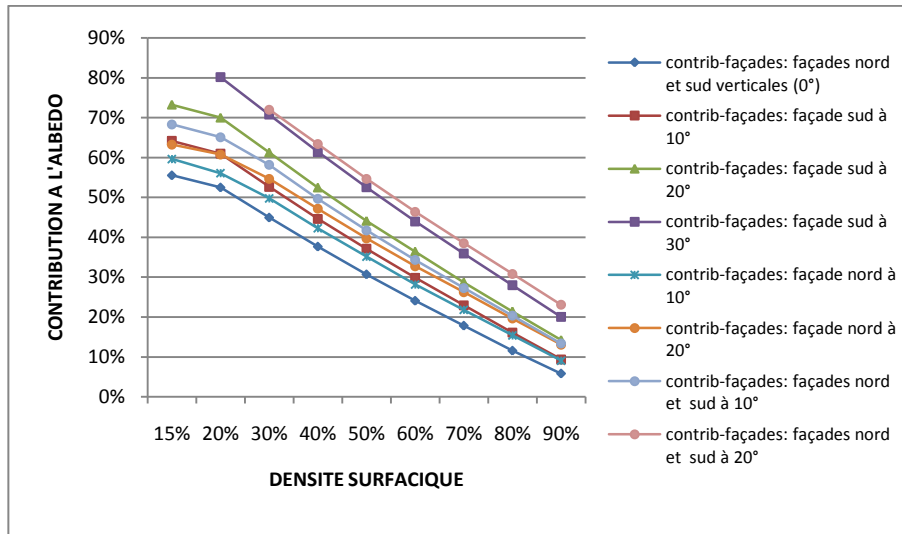


Figure 96 : Les tendances de contribution des façades du canyon EO à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité urbaine pour différents angles d'inclinaison des façades nord et sud. (H=15m).

La contribution des façades à l'albédo effectif augmente avec l'angle d'inclinaison au même titre qu'avec le nombre de façades inclinées. L'influence de l'inclinaison des façades sud est plus grande que celle des façades nord au niveau des densités faibles. Ces différences s'estompent au niveau des densités fortes (rapprochement des courbes). Le phénomène s'explique par le fait que les façades nord sont d'autant plus exposées aux flux réfléchis (par les surfaces adjacentes et notamment les façades sud) que la distance qui les séparent du voisinage est courte (densité élevée).

▪ *Les contributions du sol (fig.96)*

Les courbes de variation de la contribution du sol à l'albédo effectif le 21/12 manifestent une certaine complexité. L'effet de l'inclinaison des façades sud n'est pas simple, tout comme leur effet sur la variation de l'albédo effectif. A priori, cette variation ne suit pas la logique qui dit que la contribution du sol à la réflexion vers le ciel augmente avec le facteur de vue de ciel : Pour la plage de densité 15-50%, la contribution du sol diminue avec l'inclinaison des façades sud, et au delà de la densité 50%, la situation s'inverse (fig.97).

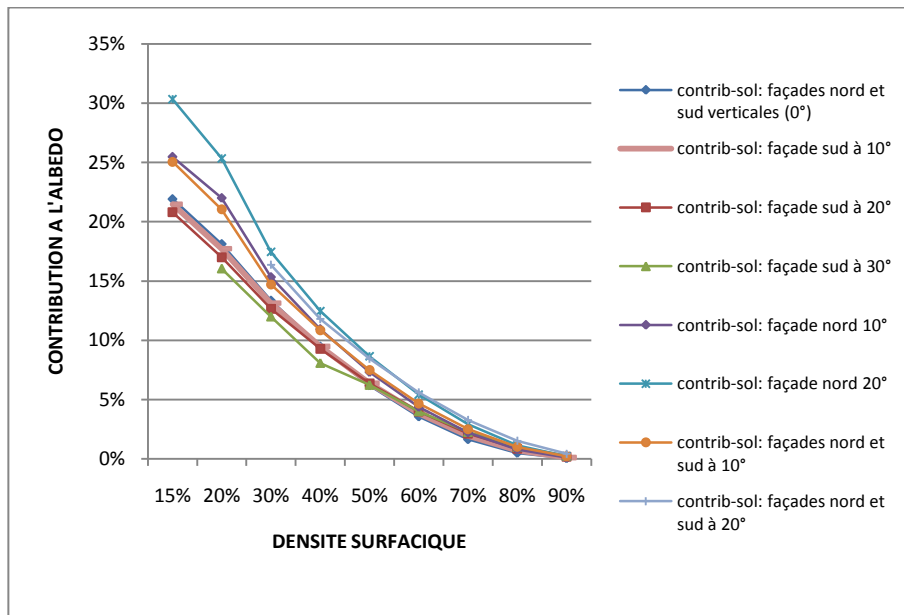


Figure 97 : Les tendances de contribution du sol du canyon EO à l'albédo effectif en fonction de la densité urbaine, pour différents angles d'inclinaison des façades nord et sud. (H=15m).

Souvenons nous que le calcul des contributions s'est fait le 21/12, au moment où la hauteur solaire est à son plus bas niveau. Les flux incidents sur la surface du sol, renvoyés par les surfaces de façades sud (dont le poids dans la réflexion solaire est prépondérant au mois de décembre), est plus important si les façades étaient verticales (Le facteur forme des éléments de contours du sol et des façades sud diminuent avec l'inclinaison de ces dernières). Ceci explique qu'au mois de décembre et pour la plage de densité 15%-50%, la contribution du sol diminue en fonction de l'angle d'inclinaison des façades orientées sud.

Avec la densité, les flux incidents sur le sol diminuent progressivement. Il se pourrait qu'à partir de la densité 50% l'inclinaison des façades sud provoque une toute légère hausse de la contribution du sol (les flux incidents sur le sol sont déjà très faibles).

2. Etude du Canyon NS

a) L'effet de la densité sur les contributions (tab38 et fig.97)

Densité	contrib-sol	contrib-toit	contrib-fac	Albédo effectif
15%	49,26%	22,10%	28,63%	30,25%
20%	43,49%	28,97%	27,54%	30,77%
30%	32,80%	41,90%	25,30%	30,91%
40%	23,32%	53,77%	22,91%	33,20%
50%	15,18%	64,42%	20,40%	34,65%
60%	9,16%	73,85%	16,99%	36,24%
70%	4,53%	82,27%	13,20%	38,06%
80%	1,46%	89,35%	9,18%	40,09%
90%	0,27%	95,25%	4,48%	42,37%

Tableau 38 : Valeurs des contributions des surfaces urbaines du canyon NS à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité (H=15m).

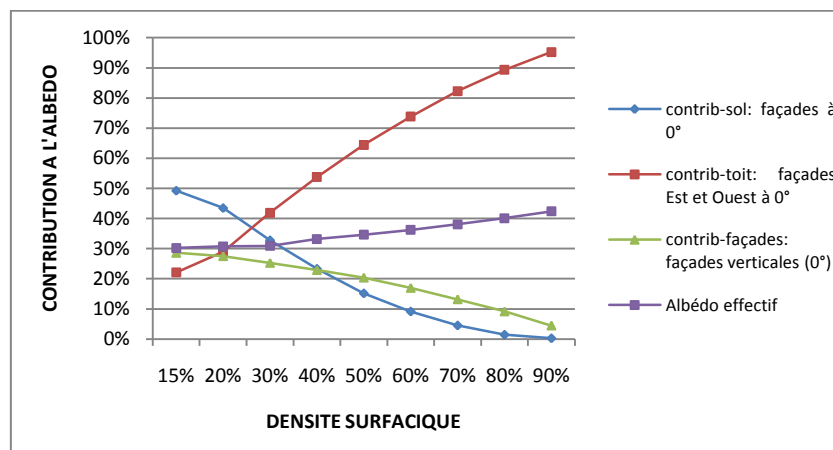


Figure 98 : Les tendances de contribution des surfaces urbaines du canyon NS à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité (H=15m).

Les valeurs d'albédo effectif consignées dans le tableau ainsi que les courbes de tendance de contributions des différentes surfaces (sol, toits et façades) montrent que :

- **Les toits**

Les valeurs et la tendance de variation de la contribution des toits du canyon NS sont les mêmes que celles relatives au tissu canyon EO (comparer les résultats de tableaux de valeurs) : La contribution des toits augmente avec la densité urbaine.

▪ *Les façades*

La contribution des façades suit le même profile que celui dans le cas du canyon EO, mais les écarts de valeurs enregistrés sont d'autant plus important que la densité est faible. Le phénomène s'explique par le fait que l'ensemble des façades nord et sud du canyon EO bénéficie d'apports solaires plus importants aux alentours de midi alors que, pendant ce même horaire, les faisceaux solaires sont parallèles aux rues canyon NS et les façades Est et Ouest ne bénéficient que d'apports énergétiques négligeables. Les différences de flux incident, aussi bien sur les façades nord et sud que sur les façades Est et ouest, s'estompent pour les densités fortes (à cause du faible pourcentage de vue de ciel des façades des deux tissus).

▪ *Le sol*

La variation de la contribution du sol est similaire à celle relative au tissu canyon EO. Les écarts sont également d'autant plus important que la densité est faible : dans le canyon NS, la surface du sol est beaucoup plus exposée aux flux solaires incidents, notamment vers midi, d'où son fort pouvoir réfléchif. Quant au tissu canyon EO, l'effet du masque (causé par l'obstruction des bâtiments) sur le sol est prépondérant et se fait sentir notamment vers midi (malgré que, le matin et le soir, des flux solaires de faibles intensités parviennent à pénétrer latéralement en profondeur du canyon EO).

b) L'effet de l'inclinaison des façades sur les contributions

▪ *Les contributions des toits (fig.98)*

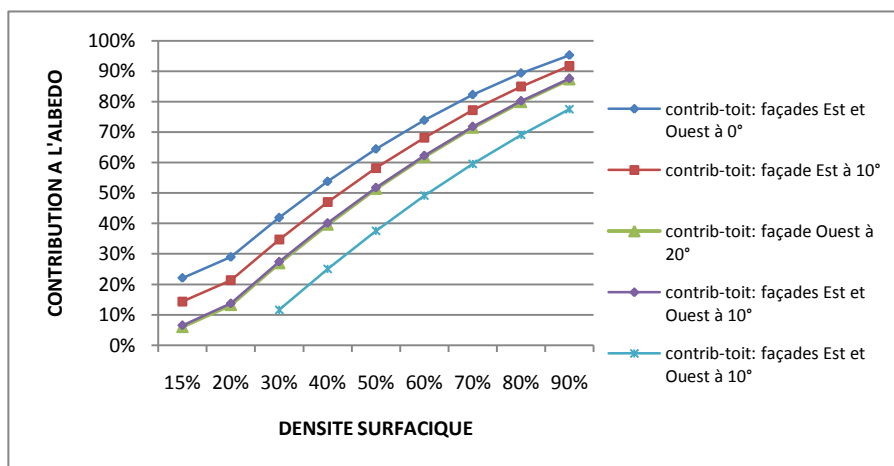


Figure 99 : Les tendances de variation des contributions des toits du canyon NS à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité, pour différents angles d'inclinaison des façades E et O. (H=15m)

L'inclinaison des façades, quel que soit leur orientation, provoque une diminution de la contribution des toits à l'albédo effectif. L'effet de l'inclinaison ne fait que réduire leur surfaces d'incidence des flux solaires (surfaces des toits), d'où l'affaiblissement de leurs apports réfléchitifs vers le ciel.

▪ *Les contributions des façades est et ouest (fig.99)*

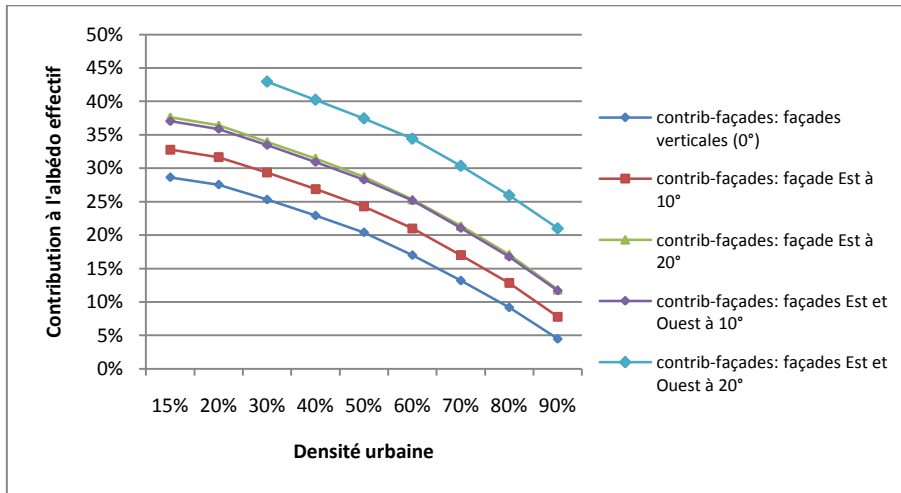


Figure 100 : Les tendances de variation des contributions des façades du canyon NS à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité, pour différents angles d'inclinaison des façades E et O (H=15m).

La comparaison entre les contributions des façades du canyon EO avec celles du canyon NS révèle la même tendance de fluctuation des valeurs, c'est-à-dire d'une hausse des contributions en fonction de l'angle d'inclinaison. La différence réside dans le fait que, pour le canyon NS, les façades Est et Ouest présentent le même poids dans la réflexion solaire : Incliner une seule façade de 20° revient à incliner deux façades différemment orientées de 10° chacune.

▪ *Les contributions du sol (fig.100)*

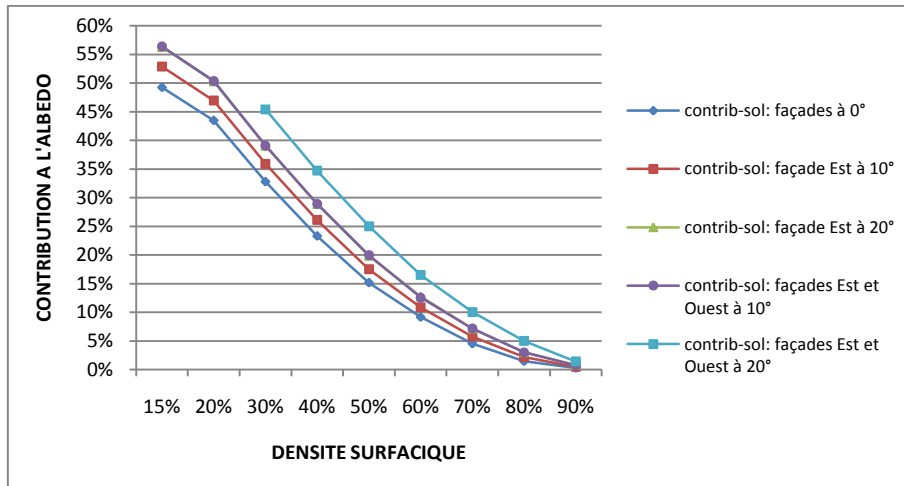


Figure 101 : Les tendances de variation des contributions du sol du canyon NS à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité, pour différents angles d'inclinaison des façades E et O (H=15m).

Il apparaît clair, à partir de la figure 100, que la contribution du sol à l'albédo effectif varie de manière simple en fonction de l'inclinaison de chacune des façades bordant le canyon NS. La variation des valeurs est univoque quel que soit la façade affectée. Nous enregistrons une ascension de la contribution du sol en fonction du facteur d'inclinaison. Les valeurs de contributions tendent vers le même niveau 0 au niveau de la densité maximale théorique 100%.

IV. L'APPROCHE PHYSIQUE DU CANYON EST OUEST

		Réflectivité des façades		Réflectivité des sols		morphologie	
		fac_N	Faç-S	Sol-N	Sol-S	Hauteur	Densité
NIV.	1	0,1	0,1	0,05	0,05	10	10
	2	0,45	0,45	0,25	0,25	20	30
	3	0,8	0,8	0,45	0,45	30	50

Tableau 39 : Valeurs de réflectivité des surfaces urbaines du canyon EO

ESSAIS	ref_façades		ref_sol		hauteur	densité
	ref_fac_N	ref_fac_S	ref_sol_N	ref_sol_S		
1	0,1	0,1	0,05	0,05	10	15
2	0,1	0,1	0,05	0,05	20	40
3	0,1	0,1	0,05	0,05	30	80
4	0,1	0,45	0,25	0,25	10	15
5	0,1	0,45	0,25	0,25	20	40
6	0,1	0,45	0,25	0,25	30	80
7	0,1	0,8	0,45	0,45	10	15
8	0,1	0,8	0,45	0,45	20	40
9	0,1	0,8	0,45	0,45	30	80
10	0,45	0,1	0,25	0,45	10	40
11	0,45	0,1	0,25	0,45	20	80
12	0,45	0,1	0,25	0,45	30	15
13	0,45	0,45	0,45	0,05	10	40
14	0,45	0,45	0,45	0,05	20	80
15	0,45	0,45	0,45	0,05	30	15
16	0,45	0,8	0,05	0,25	10	40
17	0,45	0,8	0,05	0,25	20	80
18	0,45	0,8	0,05	0,25	30	15
19	0,8	0,1	0,45	0,25	10	80
20	0,8	0,1	0,45	0,25	20	15
21	0,8	0,1	0,45	0,25	30	40
22	0,8	0,45	0,05	0,45	10	80
23	0,8	0,45	0,05	0,45	20	15
24	0,8	0,45	0,05	0,45	30	40
25	0,8	0,8	0,25	0,05	10	80
26	0,8	0,8	0,25	0,05	20	15
27	0,8	0,8	0,25	0,05	30	40

Tableau 40 : La matrice d'expériences illustrant les 27 combinaisons physiques pour le calcul de l'albédo effectif du canyon EO.

ESSAIS	Déc.	Mars	juin
1	8,04%	7,63%	7,41%
2	14,63%	14,07%	13,53%
3	24,90%	24,73%	24,45%
4	22,30%	20,38%	18,97%
5	24,28%	22,09%	19,42%
6	27,86%	27,30%	25,86%
7	39,68%	34,92%	31,66%
8	35,31%	31,81%	26,57%
9	30,90%	29,97%	27,43%
10	17,50%	22,59%	23,88%
11	25,15%	25,06%	25,43%
12	10,33%	12,44%	16,33%
13	24,72%	20,95%	21,76%
14	28,79%	28,31%	26,65%
15	24,36%	18,59%	15,99%
16	34,56%	25,79%	20,48%
17	32,70%	31,87%	28,56%
18	38,22%	30,91%	18,16%
19	25,60%	25,37%	26,54%
20	11,77%	14,06%	20,39%
21	16,81%	16,09%	19,66%
22	29,57%	29,08%	27,92%
23	27,04%	26,01%	20,26%
24	28,55%	27,07%	23,71%
25	33,85%	32,81%	28,15%
26	39,97%	24,12%	17,69%
27	41,07%	37,95%	24,27%

Tableau 41 : Calcul des valeurs d'albédo effectif des 27 combinaisons physiques du canyon EO.

1. L'effet de la densité et de la hauteur

Densité surfaique	Niveaux	Déc.	Mars	Juin	Hauteur	Niveaux	Déc.	Mars	Juin
	D=15%	24,64%	19,44%	18,54%		H=10m	26,20%	24,39%	22,98%
	D=40%	26,38%	24,27%	24,04%		H=20m	26,63%	24,15%	22,06%
	D=80%	28,81%	28,28%	26,78%		H=30m	27,00%	25,01%	21,76%

Tableau 42 : Les effets moyens des niveaux de la densité et de la hauteur du canyon EO

Les valeurs moyennes d'albédo consignées dans le tableau41 manifestent un phénomène important. L'albédo effectif augmente avec la densité urbaine (GROLEAU, 2008). Mais l'augmentation est tellement lente qu'il doit y avoir dans la matrice une explication à ce phénomène. La hauteur des bâtiments n'a pas l'air d'influencer l'albédo effectif, ce qui est étrange, mais nous avons également une explication rationnelle à cette tendance :

Le calcul de l'effet de ces deux facteurs morphologique tient lieu pour des combinaisons matérielles diverses. Il devient difficile de comparer deux géométries de même hauteur et de matériaux différents, car il y a une très forte probabilité que les albédos effectifs correspondant aux deux formes soient très différents. Le même problème peut se présenter pour deux géométries de hauteurs différentes. Une géométrie de hauteur 30m peut avoir un albédo supérieur à une géométrie de hauteur plus faible (10 m). puisque la méthode des plans d'expériences procède par le calcul des moyennes des effets, les résultats sont tels que les valeurs sont presque constantes pour ce qui est d'effet de la hauteur des bâtiments, et la variation de l'albédo en fonction de la densité est très lente.

2. L'effet de la hauteur solaire

D'après le tableau des réponses, 63% des cas manifeste une régression des valeurs d'albédo avec la hauteur solaire, 22% connaissent une constance des valeurs d'albédo en fonction des saisons et 15% connaissent une légère ascension de l'albédo du mois de décembre en juin. Le calcul des valeurs moyennes des 27 cas pour chaque date (dénommées effets globaux) ne donne pas une appréciation fidèle aux tendances diverses de variation saisonnières de l'albédo effectif, mais une vision globale sur la situation qui avait plus de chance d'avoir lieu. Nous essaierons de justifier les phénomènes qui se sont produits et les trois tendances observées, tout en avançant certaines hypothèses.

a) Cas où l'albédo effectif n'est guère sensible à la hauteur solaire (26%)

➤ **Cas (1, 2 et 3) :** Plusieurs cas d'études ne manifestent aucune sensibilité à la variation de la hauteur solaire. Ce sont effectivement les cas où les réflectivités des différentes surfaces urbaines (sol, façades et toits) sont très proches (0.1 et 0.05). Le matériau des surfaces urbaines est supposé être homogène d'où les valeurs d'albédo sont constantes au cours du cycle saisonnier. Les écarts entre les valeurs d'albédo ne dépassent guère 1% quel que soit la densité urbaine (15, 40 ou 80%).

➤ **Cas (6, 11, 14, 19 et 22) :** Vu que l'emprise du bâti au sol est très forte (D=80%), la surface des toits prédomine au dépend des façades et du sol dont les facteurs de vue de ciel sont affaiblis. Les flux solaires, que ce soit en décembre, mars ou juin, voient majoritairement les toits. L'albédo effectif dépend donc principalement de la réflectivité des toits. (d'autant plus que l'écart entre la réflectivité du toit et des façades sud est relativement faible : 0.15 à 0.2)

b) Cas où l'albédo effectif diminue avec la hauteur solaire (59%)

Les cas qui ont subi une régression des valeurs d'albédo entre décembre et juin, présentent des matériaux de sol et de toitures moins réfléchissant que les matériaux des façades sud, une situation propice à la diminution des flux réfléchis vers le ciel en été. Cette régression est d'autant plus rapide que l'écart entre les valeurs de réflectivité est important.

➤ **Cas4, 5, 13, 23 et 24 ($H=10, 20, 10, 20$ et $30m$, $D=15, 40, 40, 15$ et 40%):** une régression de 3 à 7% pour un écart aussi faible de (0.15 à 0.2). Une étude comparative et minutieuse entre ces cas permet de constater que les variations rapides correspondent aux géométries dont le sol sud est plus réfléchissant (cas23 et24).

➤ **Cas7 et 8 ($H=10$ et $20m$, $D=15$ et 40%):** une régression d'environ 8 à 9% pour un écart enregistré de (0.35)

➤ **Cas15 ($H=30m$, $D=15\%$):** manifeste la même chute d'albédo (8%) que les cas7 et 8, malgré que l'écart de réflectivité soit moins important (0.2). En fait, la surface des façades sud est plus importante, leur poids s'est notablement affaibli avec la hauteur solaire au profit de la réflexion du sol.

➤ **Cas16, 26 et 27($H=10, 20$ et $30m$, $D=40, 15$ et 40%):** connaissent une régression de 14, 22 et 17% pour un écart de 0.65. La comparaison entre ces trois cas révèle que la réflectivité du sol sud est derrière la variation rapide de l'albédo. La géométrie N°26 présente une surface de sol prédominante ($D=15\%$) et un sol sud très absorbant (0.05) : il y a eu une chute de l'albédo de 22% entre décembre et juin.

➤ **Cas18 ($H=30m$, $D=15\%$):** connaît une régression plus importante que le cas16 malgré qu'il manifeste le même écart de réflectivité (0.65). La chute qui est de l'ordre de 20% est due à l'affaiblissement rapide du poids des façades sud, de surface plus importante, mais également à cause de l'importance de la surface du sol.

➤ **Cas9, 17 et 25 ($H=30, 20$ et $10m$, $D=80\%$):** Ces cas connaissent une régression de l'albédo de 4 à 5%, malgré que nous ayons admis que pour les fortes densités l'albédo demeure constant. Il arrive si l'écart de réflectivité entre les façades sud et le toit est important (0.5), que l'albédo diminue sans pour autant que cette baisse soit importante.

c) Cas où l'albédo effectif croit avec la hauteur solaire (15%)

Les cas qui se présentent offrent des conditions communes : les densités sont moyennes (40%) ou faibles (15%) et les réflectivités des toits et du sol sont supérieures à celles des façades sud.

➤ *Les cas 10 et 12 (H=10 et 30m, D=40 et 15%)*: se voient leurs albédos effectifs croître de 6% entre le mois de décembre au juin. L'ampleur de cette hausse est due au fait que les tissus urbains sont peu denses (importance de la surface du sol) et que les matériaux du sol et des toits (0.35 et 0.3) sont plus réfléchissants que ceux des façades sud (0.1) : Avec la hauteur solaire, ce sont les surfaces planes qui prennent du poids dans la réflexion.

➤ *Les cas 20 et 21 (H=20 et 30m, D=15 et 40%)* : les écarts de réflectivité entre les matériaux des façades sud (0.1) d'une part, et ceux du sol et des toits (0.35 et 0.3) d'autre part, font également que l'albédo croit avec l'angle d'incidence solaire. Cependant, malgré qu'elles aient la même combinaison matérielle, la géométrie N°20 se voit son albédo augmenter de 9% alors que la géométrie N°21 connaît une variation plus faible d'environ 3%. Le phénomène est probablement dû au fait que le premier tissu s'apparente plus à une surface plane régulière, du fait de sa faible densité (15%) et hauteur (20m), que le deuxième où l'obstruction au sol est plus élevée à cause de la hauteur (30m) et de la densité (40%).

3. La sensibilité de l'albédo à la variation des matériaux

Le calcul des effets moyens des niveaux de réflectivité des surfaces du canyon EO sont consignées dans l'annexe14.

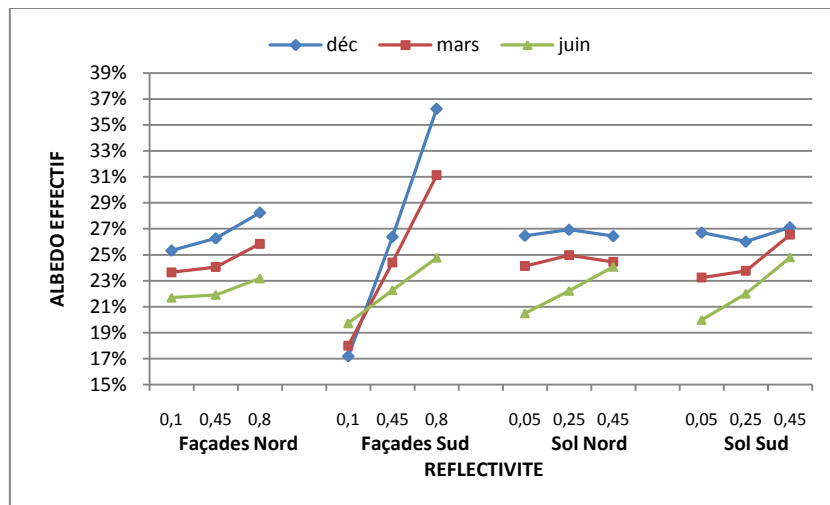


Figure 102 : L'effet de la réflectivité des surfaces urbaines du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif.

Rappelons-nous que l'évaluation du poids des facteurs sur la réponse se fait en se référant à la pente de chaque courbe correspondante à l'effet de chaque facteur. Le tracé des courbes d'effet des réflectivités respectives des façades sud et nord ainsi que des facettes des sols qui leurs sont contigües (fig.101), révèle que :

a) Les façades sud

L'influence des façades sud sur l'albédo effectif est majeure au mois de décembre et mars, des périodes au cours desquelles les rayonnements solaires sont bas et le taux d'exposition solaire diurne de ces façades est important. Le changement de réflectivité des façades sud provoque une variation très rapide des valeurs d'albédo. Bien que ces courbes soient faites sur la base des valeurs moyennes d'albédo (revoir la méthode de calcul de l'effet moyen d'un facteur), elles peuvent nous renseigner sur l'amplitude des écarts résultant du changement des matériaux des surfaces : si ces écarts indiquent une marge de 20% due à l'attribution d'une réflectivité de 0.8 au lieu de 0.1, c'est que l'albédo hivernal est très sensible à ces orientations sud.

En juin l'influence des façades sud baisse et les écarts d'albédo saisonniers s'estompent, du fait de la forte inclinaison des rayonnements incidents (l'amplitude des écarts est d'environ 6%).

b) Les façades nord

Quel que soit la saison, les façades nord ont une faible influence sur la variation de l'albédo effectif. Ceci est manifeste à travers la faible pente des courbes saisonnières.

c) Les sols nord et sud

Les surfaces du sol contigües aux façades nord et sud manifestent, à priori, un comportement un peu différent durant les saisons. L'albédo effectif est quasiment constant et ne varie pas en fonction de la réflectivité du sol nord au mois de décembre et mars : ceci est dû au fait que ces orientations ne voient pas suffisamment de flux solaires au moment où l'angle d'incidence solaire est faible ou moyen. Le sol sud manifeste, au mois de mars, une légère influence sur l'albédo : celui-ci augmente de manière lente en fonction de la réflectivité. Durant l'été, les surfaces du sol nord et sud commencent à avoir du poids dans la réflexion et contribuent à l'augmentation de l'albédo avec la hauteur solaire d'autant plus que leur matériau de surface est réfléchissant. L'influence du sol au mois de juin est supérieure à celle des façades sud si l'on tient compte, lors de la comparaison entre les pentes des courbes, de la différence d'échelle de réflectivité entre les deux types de surfaces. (Les courbes estivales des sols auront une pente plus forte que la courbe des façades sud).

d) Conclusion

Il faut prendre ses précautions lors de l'analyse des courbes des effets des facteurs. Les marges de valeurs de réflectivité des façades et du sol ne sont pas les mêmes ce qui influe sur la pente des courbes et camoufle certains phénomènes. En fait, les courbes des effets estivaux des façades sud et des sols ont presque la même pente, ce qui n veut pas dire que les façades et le sol ont le même poids. Si nous avons varié la réflectivité d sol de 0.1 à 0.8, nous aurions eu une pente plus forte que celle des façades sud.

Nous pouvons conclure donc que, durant la saison d'hiver et de printemps, ce sont les façades sud qui réfléchissent et absorbent le plus d'énergie. Les façades nord ne présentent presque aucune influence. Quant au sol, nous admettons pour le moment que leur impact est négligeable durant les saisons d'hiver et de printemps, mais très important en été. L'étude des contributions des différentes surfaces vont nous permettre d'explicitier mieux les phénomènes.

4. Les contributions des surfaces urbaines à l'absorption

Afin d'appuyer les résultats précédents, nous avons calculé une deuxième réponse de la matrice élaborée : Les contributions de chacune des surfaces élémentaires à l'albédo (Annexes 15). Les moyennes des contributions correspondant à chaque niveau de réflectivités (Annexe16) permettent de tracer les courbes correspondant au poids des façades et des sols dans la contribution à l'absorption.

Rappel : Solène donne, dans des cas assez rares pour les façades nord, des valeurs d'énergie réfléchie vers le ciel excédant légèrement le flux incident : Une raison pour laquelle, lors du calcul des contributions de ces façades, nous croisons des fois des valeurs négatives mais très faibles (valeurs très proches de 0 et notées en rouge). Ces erreurs de calcul n'affectent pas les résultats du fait de leur rareté. Elles peuvent être considérées comme des valeurs nulles correspondant à de très faibles contributions à l'albédo effectif ou à l'absorption.

a) Les contributions saisonnières

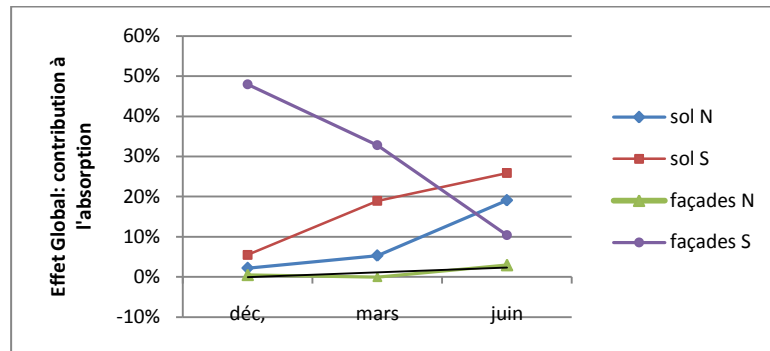


Figure 103 : La variation saisonnière des contributions des surfaces urbaines du canyon EO à l'absorption.

Toutes les contributions des surfaces urbaines à l'absorption solaire évoluent linéairement en fonction de la variation du cycle saisonnier (fig.102):

- Les façades sud, comme prévu, contribuent de moins en moins à l'absorption solaire au fur et à mesure que l'angle d'incidence solaire augmente. Cette variation est rapide vue la pente de décroissance de la courbe correspondante.
- Les façades nord ne manifestent presque aucune sensibilité à la variation de la hauteur solaire car les rayonnements directs ne les concernent que très rarement. Ce n'est qu'au mois de juin, au lever du soleil (hauteur solaire très faible), que le flux solaire peut avoir accès aux surfaces orientées nord. La courbe de tendance correspondant à la contribution des façades nord montre une légère augmentation de décembre en juin.
- Les deux courbes respectives des contributions des sols nord et sud manifestent une ascension des valeurs avec la hauteur solaire. Il s'avère que la contribution du sol sud est plus élevée du fait de l'importance des rayonnements incidents durant les trois saisons (l'effet d'obstruction affecte plus les surfaces de sol contiguës aux façades nord).

b) L'effet des matériaux sur les contributions (fig.103)

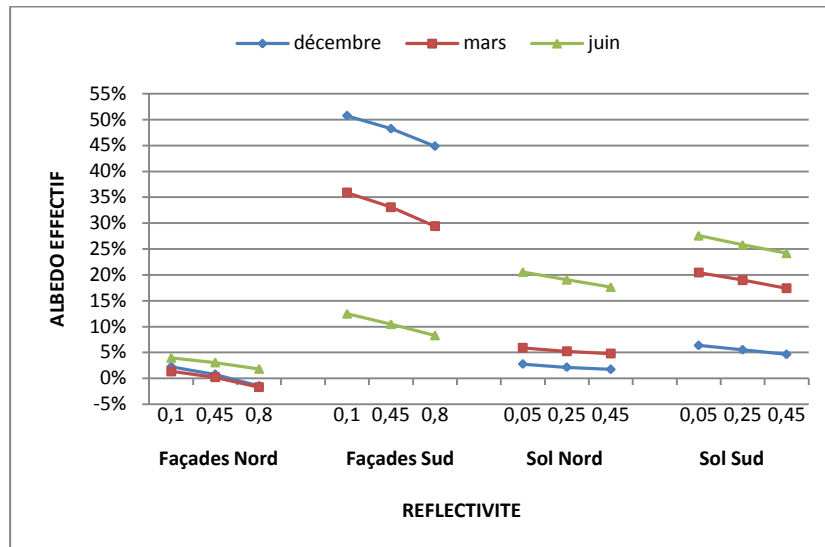


Figure 104 : L'effet de la réflectivité des matériaux urbains du canyon EO sur les contributions des surfaces urbaines à l'absorption

- **Les façades sud**

Les façades sud gardent toujours leur influence « suprême » sur l'absorption énergétique de la forme urbaine au mois de décembre et juin : rien qu'en regardant les marges des valeurs des contributions, nous pouvons statuer sur l'importance des gains en provenances de ces orientations (45 à 50% au mois de décembre et 30 à 35% au mois de mars). En juin, nous admettons que les contributions à l'absorption sont faibles. L'écartement des courbes saisonnières montre que les façades sud peuvent représenter des moyens de régulation des gains entre les périodes froides et chaudes, un phénomène qui est déjà perçu à travers trois courbes de pentes différentes.

- **Les façades nord**

Les façades nord gardent leur poids infime dans l'absorption solaire (valeurs moyennes comprises entre 0 et 5%). Les courbes saisonnières des contributions se superposent presque, un signe d'indifférence au cycle saisonnier.

- **Les sols nord et sud**

En regard des courbes du mois de décembre, les contributions des sols sont faibles, généralement en dessous du seuil de 5%. En mars, le sol sud a l'air d'avoir du poids (20%) puisque sa contribution ne s'éloigne pas beaucoup de celle des façades sud. Durant le mois de juin, toute la surface du sol prend du poids au dépend du reste des surfaces verticales : Les sols nord et sud peuvent influencer fortement de manière conjointe sur les gains estivaux de la forme urbaine. Les moyennes respectives des contributions à l'absorption urbaine sont de l'ordre de 20 et 25% (voire la figure).

V. L'APPROCHE PHYSIQUE DU CANYON NORD SUD

La matrice élaborée pour l'étude du canyon NS est exactement la même que celle utilisée pour l'attribution des matériaux urbains au canyon EO (tab.44). Outre les facteurs et niveaux de réflectivité, le canyon NS garde également les mêmes propriétés géométriques (même niveaux de hauteur et de densité). En d'autres termes, nous avons fait subir au tissu canyon EO, doté déjà de matériaux divers, une rotation de 90° pour avoir le canyon NS. Une opportunité nous est donc offerte pour évaluer, ultérieurement, l'impact de l'orientation du tissu canyon sur l'albédo effectif, et ce pour des surfaces élémentaires hétérogènes en termes de réflectivité.

	Réflectivité des façades		Réflectivité du sol		Hauteur (m)	Densité Surfacique (%)	Ecart saisonniers D'albédo
	ref_fac_E	ref_fac_O	ref_sol_E	ref_sol_O			
1	0,1	0,1	0,05	0,05	10	15	0
2	0,1	0,1	0,05	0,05	20	40	0
3	0,1	0,1	0,05	0,05	30	80	0
4	0,1	0,45	0,25	0,25	10	15	0
5	0,1	0,45	0,25	0,25	20	40	0
6	0,1	0,45	0,25	0,25	30	80	0
7	0,1	0,8	0,45	0,45	10	15	0
8	0,1	0,8	0,45	0,45	20	40	0
9	0,1	0,8	0,45	0,45	30	80	0
10	0,45	0,1	0,25	0,45	10	40	0
11	0,45	0,1	0,25	0,45	20	80	0
12	0,45	0,1	0,25	0,45	30	15	0
13	0,45	0,45	0,45	0,05	10	40	0
14	0,45	0,45	0,45	0,05	20	80	0
15	0,45	0,45	0,45	0,05	30	15	-1
16	0,45	0,8	0,05	0,25	10	40	-1.2
17	0,45	0,8	0,05	0,25	20	80	0
18	0,45	0,8	0,05	0,25	30	15	-1.-25
19	0,8	0,1	0,45	0,25	10	80	0
20	0,8	0,1	0,45	0,25	20	15	0
21	0,8	0,1	0,45	0,25	30	40	0
22	0,8	0,45	0,05	0,45	10	80	0
23	0,8	0,45	0,05	0,45	20	15	-1.0
24	0,8	0,45	0,05	0,45	30	40	-1
25	0,8	0,8	0,25	0,05	10	80	-0.6
26	0,8	0,8	0,25	0,05	20	15	-2.5
27	0,8	0,8	0,25	0,05	30	40	-2

Tableau 43 : Les 27 combinaisons physiques du canyon NS pour le calcul de l'albédo effectif

ESSAIS	ALBEDO EFFECTIF		
	<i>Déc.</i>	<i>mars</i>	<i>juin</i>
1	7,61%	7,58%	7,54%
2	13,89%	13,84%	13,81%
3	24,54%	24,52%	24,52%
4	18,37%	18,46%	18,50%
5	19,27%	19,17%	19,11%
6	25,86%	25,80%	25,75%
7	30,32%	30,48%	30,56%
8	25,66%	25,50%	25,44%
9	27,28%	27,17%	27,08%
10	23,17%	23,33%	23,47%
11	25,99%	25,96%	25,93%
12	16,17%	16,29%	16,33%
13	23,37%	23,18%	22,99%
14	27,72%	27,61%	27,53%
15	20,29%	19,73%	19,30%
16	23,21%	22,53%	22,05%
17	29,58%	29,41%	29,25%
18	23,71%	22,71%	21,71%
19	27,64%	27,60%	27,53%
20	23,02%	22,89%	22,77%
21	23,00%	22,86%	22,68%
22	29,31%	29,11%	28,93%
23	24,53%	23,79%	23,11%
24	27,81%	27,25%	26,75%
25	30,96%	30,71%	30,37%
26	26,35%	25,05%	23,83%
27	32,60%	31,76%	30,84%

	<i>Déc.</i>	<i>mars</i>	<i>juin</i>
Effet global	24,12%	23,86%	23,62%

Tableau 44 : Les valeurs d'albédo effectif des 27 combinaisons physiques du canyon NS

1. L'effet de la hauteur solaire sur l'albédo effectif

Le tableau () montre que l'albédo effectif ne varie pas en fonction du cycle saisonnier pour les 27 cas simulés. Ce phénomène s'explique par le fait que la typologie du canyon NS offre la même opportunité aux façades et au sol pour que les flux soient distribués à tour de rôle et probablement au même taux durant les saisons: En effet, les façades est et ouest prennent du poids durant les horaires matineux et l'après midi (en hiver et en été), alors que le sol prend de l'importance uniquement vers midi, profitant d'un flux solaire beaucoup plus intense (angle d'incidence normal à la surface du sol).

Les cas uniques au niveau desquels nous avons pu enregistrer une légère baisse d'albédo effectif (1 à 2%), entre décembre et juin, sont les cas 16, 18, 23, 24, 26 et 27. Si nous comparons la moyenne de réflectivité des façades d'une part (0.62 pour le cas 16, 18, 23 et 24 ; 0.80 pour les cas 26 et 27) et celles du sol (entre 0.15 et 0.20 pour tous les cas) et des toits (0.3) d'autre part, nous pouvons comprendre que la baisse de l'albédo est dû à la faible réflectivité des surfaces horizontales au moment où les rayonnements sont quasi normaux à la surface du sol et des toits.

2. L'effet des matériaux des surfaces sur l'absorption

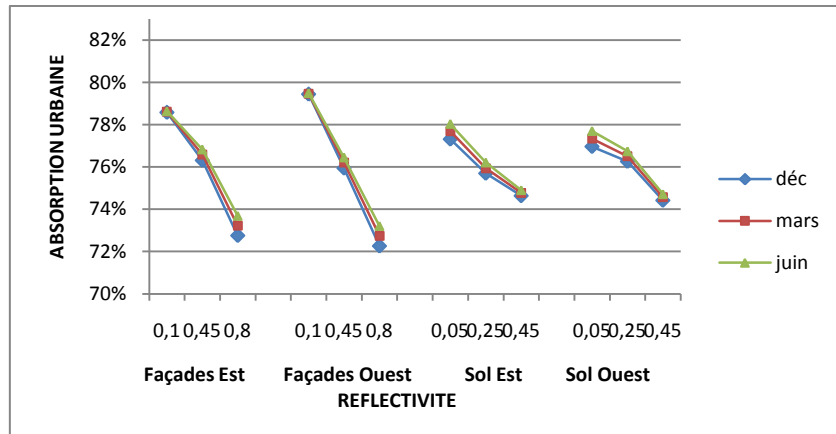


Figure 105 : L'effet de la réflectivité des surfaces urbaines du canyon NS sur l'absorption.

a) Les façades est et ouest

La figure 104 confirme les propos que nous avons avancés à propos de l'uniformité de comportement optique des façades est et ouest du canyon NS : l'absorption urbaine varie de la même façon en fonction de la variation de la réflectivité des façades, avec un peu plus de sensibilité aux façades ouest (comparer la pente des courbes des deux façades). Les valeurs numériques correspondant au graphique des effets sont consignées dans l'annexe 17.

b) Les sols est et ouest

Les sols contigus aux façades est et ouest se comportent, eux aussi, de la manière et présentent le même poids dans la variation de l'absorption. Il ne faut pas comparer les pentes des surfaces du sol et des façades car leurs marges de réflectivité ne sont pas les mêmes. Toutes les courbes auraient la même pente si l'échelle de variation des matériaux était identique (fig.104). Pour contourner ce problème et avoir une bonne appréciation de l'impact des surfaces en fonction de sa nature ou appartenance (façade ou sol), nous allons étudier une deuxième réponse de la matrice : Les contributions des surfaces

urbaines à l'absorption. Nous saurons les plages de variation des contributions des surfaces élémentaires, ce qui va rendre facile la comparaison entre les cas.

Nous concluons que pour les niveaux de réflectivité choisis d'après une base de données conforme au contexte urbain réel, toutes les surfaces urbaines ont le même poids dans la variation de l'albédo effectif.

5. L'étude des contributions à l'absorption

a) Les contributions saisonnières des surfaces (fig105)

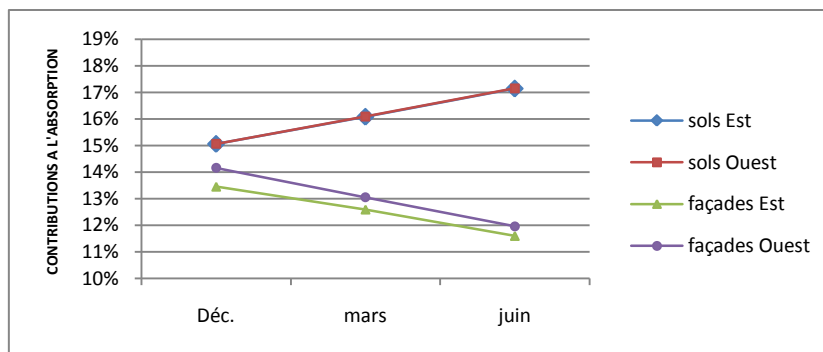


Figure 106 : La variation saisonnière des contributions des surfaces urbaines du canyon NS à l'absorption.

Les valeurs de contribution des surfaces du canyon NS à l'absorption sont consignées dans l'annexe18. Le calcul des effets globaux (moyennes des 27 cas pour chaque date) permet de statuer sur un certains nombre de phénomènes :

- Les contributions des façades est et ouest du canyon NS sont exactement pareilles et varient de manière descendante en fonction de la hauteur solaire : Les flux incidents sur les façades sont de moins en moins importants du mois décembre en juin.
- Les sols est et ouest affichent également un comportement similaire mais avec une ascension des contributions à l'absorption en fonction de la hauteur solaire.
- La courbes des façades est une image inverse de celle du sol, c'est-à-dire que la variation saisonnière de la contribution su sol s'effectue avec la même rapidité que la variation de la contribution du sol.

b) L'effet des matériaux sur les contributions des surfaces

- La figure106 rend lisible la marge de fluctuation des valeurs de contributions des surfaces urbaines du canyon NS à l'absorption. Elle permet de constater les phénomènes suivants :
- Les contributions des façades et du sol se trouvent à peu près dans une même marge de valeur 10-20%. La contribution du sol (13-19%) excède légèrement celle des façades (9-17%) : les surfaces de sol et des façades auraient pu avoir exactement la même marge de variation des contributions si l'échelle des matériaux était la même. (les courbes du sol auraient descendu un peu et la pente aurait été plus forte).
- Enfin, il apparaît évident que les façades ouest peuvent influencer un peu plus que les façades est du canyon.

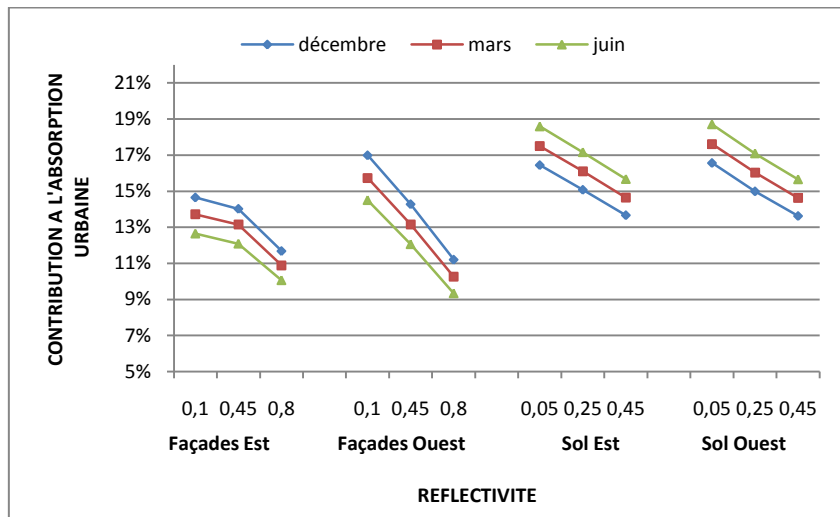


Figure 107 : L'effet de la réflectivité des surfaces urbaines du canyon NS sur les contributions des surfaces à l'absorption.

Les valeurs numériques correspondant aux courbes des effets de la figure106 sont consignées dans l'annexe19.

VI. STRATEGIE DES FORMES ET DES MATERIAUX URBAINS DU TISSU CANYON

1. Le tissu Canyon NS

Les plages des valeurs des contributions sont tellement proches qu'il est difficile de dire quelle surface contribue le plus au piégeage solaire. Dans la matrice, une sorte d'équilibre s'instaure entre les valeurs de réflectivité des façades d'une part, et du sol d'autre part. Si l'une est réfléchissante (0.8) et l'autre absorbante (0.1), les deux agiront comme une seule surface d'albédo de surface moyen (0.45). Dans 70% des cas nous trouvons que la moyenne de réflectivité des façades est et ouest est équivalente à la moyenne du sol et des toits. Environ 8% des cas ne subissent pas une variation de l'albédo effectif à cause de la forte densité ($D=80\%$: l'albédo dépend essentiellement des toits). Les 22% des cas qui restent manifestent un écart moyen de (0.5 à 0.65) entre la réflectivité du sol et des toits d'un côté, et celle des façades de l'autre côté : Ces écarts ne contribuent qu'à une baisse de 1 à 2.5% du mois de décembre au juin.

Jamais un cas ne s'est présenté avec une augmentation de l'albédo entre décembre et juin. Probablement que nous aurions pu assister à une ascension plus ou moins rapide de l'albédo effectif si les façades est et ouest étaient très absorbante (0.1) et la surface du sol et du toit était réfléchissante (0.45). Il faudrait un pourcentage de surface de façades important (hauteur élevé) et une densité faible ou moyenne pour que l'ascension soit rapide.

Nous essaierons de donner quelques exemples où ni les façades, ni le sol n'influent sur la variation saisonnière de l'albédo effectif :

- *Les cas 2 et 27*

Les cas 2 ($H=20m$, $D=40\%$) présente une réflectivité moyenne des façades 0.1, celle du sol et des toits 0.17. Le cas 27 ($H=30m$, $D=40\%$) présente une réflectivité moyenne des façades de 0.8, celle du sol et des toits est de 0.22. il s'agit presque de la même géométrie dont on a fait varié uniquement la réflectivité des façades de 0.1 à 0.8. Nous constatons que dans la première situation il n'y a guère de variation entre l'albédo de décembre et celui de juin (13.81% et 13.89%). Dans la deuxième situation, malgré que la réflectivité des façades ait passé de 0.1 à 0.8, il n'y a eu qu'une régression de 2% entre le mois de décembre et juin. Ceci montre que la réflectivité des façades n'a joué aucun rôle dans la variation saisonnière. On n'a assisté qu'à une ascension rapide de l'albédo effectif d'une moyenne de 13% à 31% (la situation est complètement différente pour le tissu canyon EO).

▪ **Les cas 8 et 13**

Ce sont deux géométries très semblables de densité 40% et de hauteur 20 et 10m. Elles ont des façades réfléchissantes d'albédo de surface moyen (0.45), mais de sol différents (0.45 et 0.25). Dans les deux combinaisons matérielles, l'albédo n'a subi aucune fluctuation en fonction des saisons. Là aussi le sol n'a joué aucun rôle sauf dans la diminution de l'albédo effectif de 25% à 23%.

En guise de conclusion, nous admettons que l'orientation NS du tissu canyon ne peut pas offrir une opportunité pour proposer des stratégies de matériaux en fonction de l'orientation des façades.

2. Tissu canyon NS

L'étude des variations saisonnières de l'albédo effectif cas par cas, en fonction des caractéristiques géométriques et réfléchives, et l'analyse des courbes des effets des matériaux des surfaces sur l'albédo et les contributions à l'absorption, permettent d'avancer les recommandations suivantes :

a) Les façades sud

Les orientations sud des façades présentent une source très importante de gains énergétiques hivernaux puisqu'elles contribuent fortement à l'absorption urbaine. Il est conseillé de leur attribuer des matériaux absorbants afin de favoriser ces gains. Ces matériaux n'auront pas un impact important durant l'été car elles seront peu concernées par les flux solaires incidents. Durant le mois de décembre, l'inclinaison des façades sud augmente l'albédo effectif entre la marge de densité 15 et 50%. Nous recommandons alors des façades verticales pour que les gains ne soient pas réduits.

b) Les façades nord

Pour la latitude que nous avons choisie, vu que les orientations nord ne présentent aucune influence sur la variation de l'albédo et que leurs contributions sont très faibles, nous pouvons probablement en profiter pour renvoyer plus de flux solaire, après les inter-réflexions, en direction des façades sud pendant l'hiver : Un matériau réfléchissant serait adéquat.

c) Le sol

Le sol n'intervient dans la variation de l'albédo que si le tissu urbain est dégagé (une faible densité et hauteur). Il prend du poids quand le soleil est au zénith. Au mois de juin, il contribue fortement à l'absorption solaire mais également aux gains reçus par les façades (FLORY, 2003), une situation non favorable car elle induit des surchauffes...il vaut mieux voir un matériau réfléchissant.

d) Les toits

Nous avons opté pour une hauteur de canopée urbaine uniforme ce qui fait que les toits n'interviennent pas ni dans les inter-réflexions, ni dans les gains reçus par les autres surfaces. Si nous nous intéressons au phénomène d'îlot de chaleur, il faudrait mieux doter les surfaces de toitures de revêtements réfléchissants pour éviter les surchauffes d'été quand l'incidence solaire est forte. Si la distribution de hauteur était aléatoire, le phénomène serait plus complexe. Certes, il y aura toujours une forte incidence sur les toits en été (l'effet d'ombre est faible malgré la différence de hauteur), mais en hiver cela accentue les gains grâce aux inter-réflexions entre les toits et les murs adjacents. Il vaudrait mieux avoir une surface réfléchissante pour éviter les canicules.

e) Des remèdes aux cas caractéristiques de la matrice

Nous allons nous situer dans des conditions où les formes urbaines existent, elles sont construites, et les améliorations à proposer ne peuvent affecter que les matériaux des surfaces. Pour adapter une géométrie urbaine aux caractéristiques saisonnière, il faut d'abord connaître ses dimensions (densité surfacique et hauteur). Par ailleurs, nous allons nous intéresser aux cas de densité moyenne et forte pour se rapprocher au contexte urbain actuel.

Nous ne pouvons résoudre tous les problèmes des géométries où l'albédo demeure constant durant le cycle saisonnier. Les cas le plus délicats sont ceux dont la densité surfacique est très forte : Modifier le matériau des toitures ne mènera pas à une variation différentielle et conséquente des valeurs d'albédo en fonction de la hauteur solaire.

➤ Le cas20 présente une situation améliorée du cas1. Nous disposons presque de la même géométrie mais l'attribution différentes des matériaux des surfaces a fait que la géométrie N°20 réfléchissante trois fois plus d'énergie vers le ciel au mois de juin (de 7 à 20%), sans que les gains hivernaux ne soient modifié (variation de 8 à 11%)

➤ Le cas2 et 3 doivent garder leurs matériaux absorbants au niveau des façades sud, mais doivent avoir un matériau de sol plus réfléchissant (0.45)

➤ Les cas 16, 26 et 27 : les matériaux des façades sud doivent favoriser l'absorption solaire au mois de décembre (0.1 au lieu de 0.8) et lutter contre les gains estivaux par l'attribution de matériaux plus réfléchissants au sol (0.45). Le cas 10 témoigne des bienfaits de cette modification. La nouvelle géométrie sortante bénéficie d'un gain deux fois plus important qu'auparavant sans que les apports estivaux soient modifiés.

[Tapez un texte]

LES RESULTATS DE LA RECHERCHE

[Tapez un texte]

I. LES RESULTATS DE LA RECHERCHE

Nous avons choisi de classifier les résultats auxquels nous sommes aboutis en deux catégories : Les résultats ayant trait à la méthodologie d'approche et de calcul de l'albédo effectif, d'une part, et les résultats inhérents à la recherche elle-même, d'autre part.

I. METHODE D'APPROCHE ET D'EXPLOITATION DES RESULTATS

1. La méthode des plans d'expériences

Si l'on souhaite étudier des facteurs très complexes, entretenant des liens de dépendance entre eux (Angle d'inclinaison des façades et nombre des façades inclinées par bâtiment ; densité surfacique et inclinaison des façades...), la meilleure façon de le faire consiste en l'étude des interactions moyennant des méthodes plus complexes. Pour l'étude des facteurs simples, la méthode des plans d'expériences s'avère très efficace en termes de rapidité et de simplicité.

2. La méthode de calcul de l'albédo effectif

Le calcul de l'albédo effectif peut s'effectuer de deux manières, théoriquement identiques, mais qui donnent des résultats différents. La bonne méthode consiste en la pondération de l'énergie réfléchi par un élément de contour, après les inter-réflexions, par le facteur de vue de ciel du contour lui-même, pour l'obtention du réfléchi vers le ciel. La deuxième méthode considère que tout ce qui n'est pas réfléchi vers le ciel est totalement absorbé par la zone de calcul (nous avons vérifié qu'une part des flux est orientée vers les bords). Outre les divergences des résultats des deux méthodes (écart d'autant plus important que la densité est faible), les tendances de variation de l'albédo sont, elles aussi, différentes. Alors que Groleau montre que l'albédo diminue depuis une densité supposée minimale (10%) jusqu'à une densité de 30%, puis remonte pour des valeurs de densité plus élevées, KONDO, lui, ne statue pas une tendance claire de variation du même indicateur, mais ses calculs décrivent une tendance tout à fait autre : L'albédo décroît jusqu'à une densité 50% puis remonte pour des densités plus élevées. Cette tendance, nous la trouvons lors des calculs basés sur la méthode touchée par les effets de bord.

Enfin, étendre la zone de calcul jusqu'au voisinage lointain n'affecte que très peu les valeurs d'albédo effectif. Ceci prouve que les inter-réflexions concernent essentiellement les surfaces qui sont proches les une des autres (juxtaposées).

II. LES RESULTATS DES ANALYSES DE LA FORME URBAINE

1. L'effet de l'inclinaison des façades

L'inclinaison des façades des modèles Plot et Canyon affectent de manière assez complexe l'albédo effectif. Aussi bien la tendance que l'intensité de la variation de l'albédo varie différemment pour chaque densité :

a) Le modèle Plot

L'albédo augmente en fonction de l'inclinaison des façades depuis une densité minimale (10%) jusqu'à une densité 30%, puis diminue pour des valeurs de densité plus élevées, quel que soit le nombre et l'orientation des façades affectées. La variation est d'autant plus rapide que l'on s'éloigne de la densité seuil 30%, c'est-à-dire pour les densités plus fortes et plus faibles.

b) Le modèle Canyon

Le canyon EO : Alors que les valeurs d'albédo effectif affichent une régression linéaire en fonction de l'angle d'inclinaison des façades nord, l'effet de l'inclinaison des façades sud est équivoque : L'albédo augmente avec l'angle d'inclinaison jusqu'à une densité 50%, puis diminue au niveau des densités supérieures. L'effet conjoint des deux façades nord et sud provoque une diminution de l'albédo d'autant plus rapide que la densité est élevée.

Le canyon NS : l'inclinaison des façades est, ouest ou les deux à la fois, fait diminuer l'albédo effectif de manière d'autant plus rapide que la densité est forte.

2. L'origine de la variation complexe de l'albédo

Les surfaces de façades sont à l'origine de la variation complexe de l'albédo effectif sous l'effet de la densité. Alors que les tendances de variation des contributions du sol et des toits (à l'albédo) sont linéaires, les contributions des façades augmentent jusqu'à la densité 30% puis baissent au niveau des densités les plus élevées : C'est l'inverse de la tendance caractéristique de l'albédo en fonction de la densité (GROLEAU, 2008).

3. L'influence typique de la densité 30%

a) L'effet sur les contributions des surfaces urbaines :

Au niveau de la densité seuil 30%, les contributions des toits et du sol s'équilibrent (Les courbes se croisent au niveau de leurs points d'inflexion), quant aux façades, elles atteignent toujours leurs contributions maximales (La courbe de tendance admet une tangente horizontale au niveau de la densité 30%).

b) L'effet de l'inclinaison des façades :

Au niveau de la densité 30%, l'effet de l'inclinaison des façades ne se fait guère sentir.

4. L'effet de l'hétérogénéité des matériaux urbains

a) Le poids du cycle saisonnier (la hauteur solaire)

L'albédo saisonnier fluctue sensiblement en fonction des matériaux des surfaces. Il peut augmenter ou régresser, selon le mode d'attribution de ces matériaux. L'effet de l'hétérogénéité des matériaux importe très peu dans un tissu urbain dense.

b) Le poids de l'orientation

Au même titre que le cycle saisonnier, l'orientation acquiert un poids important dans la variation de l'albédo effectif, sauf dans le cas des densités fortes.

c) Le poids de la forme urbaine

L'influence des caractéristiques dimensionnelles de la forme urbaine s'estompe en présence de matériaux urbains divers. Par contre l'effet des matériaux s'affaiblit en présence de tissus très denses.

5. Stratégie de matériaux urbains suivant le poids de l'orientation des façades

a) Le modèle Plot :

Les façades sud : L'absorption hivernale des façades sud est prépondérante en comparaison avec celle des autres façades. Le phénomène s'estompe beaucoup durant l'été.

Les façades est et ouest : Elles sont responsables d'une absorption accrue durant le mois de juin.

Les façades nord : Elles présentent une influence infime sur l'absorption.

Le sol et les toits : l'absorption des surfaces horizontales prend de l'ampleur quand l'angle d'incidence solaire est élevé (en été).

Stratégie : le modèle Plot s'apprête bien à l'application d'une stratégie de matériaux. Il est recommandé d'avoir des façades sud absorbantes, des façades est et ouest réfléchissantes et des toits réfléchissants. Quant à la surface du sol, nous pouvons recommander des revêtements de chaussée et de trottoirs réfléchissants afin contrer les flux incidents (éviter l'absorption). Mais, d'après CHERQUI, (2005), les gains reçus par les façades sud se verront augmenter dans ce cas. La solution consiste peut être en l'attribution d'un matériau absorbant aux sols contigus aux façades sud.

b) Le modèle Canyon EO :

Les façades sud : Elles sont source d'apports hivernaux importants par rapport aux façades nord.

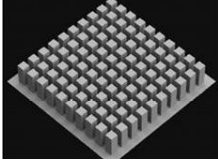

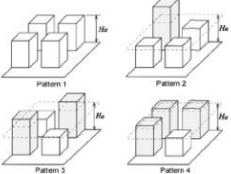

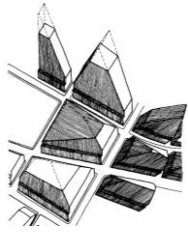
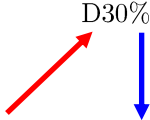
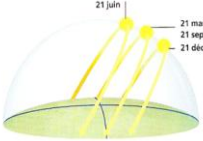

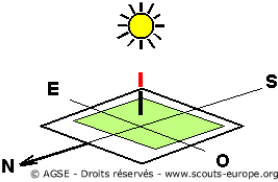

Les façades nord : Elles présentent toujours les valeurs d'absorption les plus infimes (négligeables).

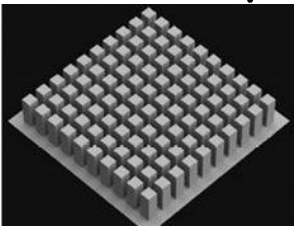
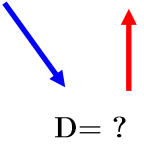
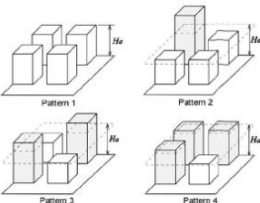
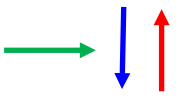
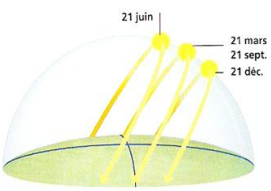
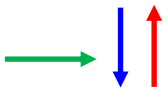
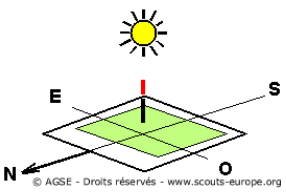
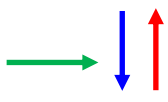
Stratégie : Le canyon EO s'apprête donc à l'application d'une stratégie de matériaux urbains. Il est conseillé d'attribuer des revêtements absorbants aux façades sud et des revêtements réfléchissant aux orientations nord. En ce qui concerne les toits et le sol, nous optons pour la même stratégie que celle du tissu Plot : Toits réfléchissants et surface du sol réfléchissante sauf pour la partie contigüe aux façades sud : Il vaut mieux qu'elle absorbe de l'énergie plus qu'elle n'en réfléchisse vers le ciel et les surfaces adjacentes.

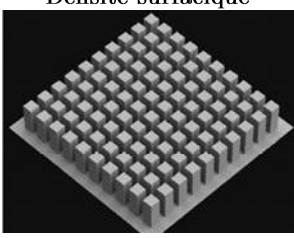
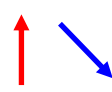


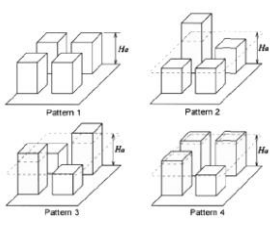




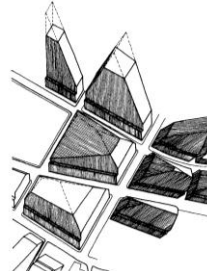



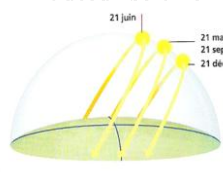



c) Le modèle NS :




Les façades est et ouest : Elles présentent le même comportement en termes de fraction d'énergie solaire absorbée durant les mois de décembre, mars et juin. Nous ne pouvons statuer sur une stratégie d'attribution de matériaux puisque l'effet saisonnier sur l'absorption des deux façades ne se fait pas sentir.

Stratégie : Le canyon NS s'apprête mal à satisfaire les besoins de lutte contre les canicules d'été et à être un modèle stratégique.

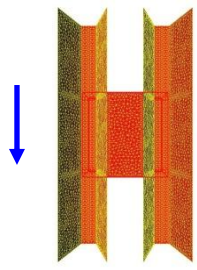
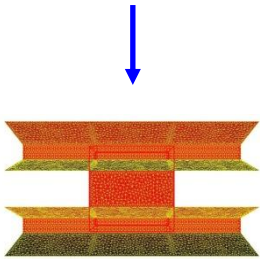
L'EFFET DE LA MORPHOLOGIE URBAINE ET DES FACTEURS SPATIO-TEMPORELS SUR L'ALBEDO EFFECTIF : MODELE PLOT, ALBEDO DE SURFACE HOMOGENE		
FACTEURS	TENDANCE	OBSERVATIONS
<p>DENSITE SURFACIQUE</p>  <p>CHENG et al (2006).</p>	 <p>D30%</p>	<p>GROLEAU : l'albédo varie de manière univoque en fonction de la densité : Il diminue depuis une densité supposée minime jusqu'à une densité 30% puis remonte rapidement pour des densités plus élevées.</p>
<p>HAUTEUR DES BATIMENTS</p>  <p>CHIMKLAI et al. (2004)</p>		<p>La variation de l'albédo en fonction de la hauteur est d'autant plus rapide que la densité est faible.</p>
<p>ANGLE D'INCLINAISON DES FAÇADES</p>  <p>L'enveloppe solaire. BROWN et DEKEY (2001)</p>	 <p>D30%</p>	<p>L'albédo augmente avec l'inclinaison des façades pour une plage de densité faible 10-30%, puis remonte pour une plage de densité 30-90%. Au niveau de la densité 30%, l'inclinaison des façades ne présentent aucun effet sur l'albédo effectif.</p>
<p>HAUTEUR SOLAIRE</p>  <p>Trajectoire du soleil aux latitudes moyennes 45°. www.meteorologic.net/climat-acteurs.php</p>		<p>GROLEAU : l'orientation n'influe pas sur l'albédo effectif.</p>
<p>L'ORIENTATION DU TISSU URBAIN</p>  <p>Source : http://www.scoutorama.org/L-orientation-avec-le-soleil-et.html</p>		<p>La hauteur solaire n'influe pas sur l'albédo effectif.</p>


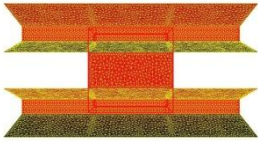
L'EFFET DE LA MORPHOLOGIE URBAINE ET DES FACTEURS SPATIO-TEMPORELS SUR L'ALBEDO EFFECTIF : MODELE PLOT, ALBEDO DE SURFACE HETEROGENE		
VARIATION DIMENSIONNELLE	TENDANCE	OBSERVATIONS
<p>DENSITE SURFACIQUE</p>  <p><i>CHENG et al (2006).</i></p>	 <p>D = ?</p>	<p>D=30% ? Avec l'hétérogénéité des matériaux urbains et notamment ceux des façades, l'albédo effectif peut enregistrer des valeurs minimales pour des densités autres que 30%.</p> <p>AIDA (1982) : En se référant à la recherche de AIDA, les caractéristiques réfléchissantes des matériaux (les comportements diffus et spéculaires) sont également à l'origine de tendances diverses de la variation de l'albédo en fonction de la densité. Pour une surface dont le comportement est mi-diffus-mi-spéculaire, l'auteur statue sur une loi qui dit que l'albédo est minimale pour une géométrie respectant le ratio ($W2/W1=0.5$).</p>
<p>HAUTEUR DES BATIMENTS</p>  <p><i>CHIMKLAI et al. (2004)</i></p>		<p>Albédo de surface homogène : Une étude comparative de plusieurs configurations urbaines de matériaux de surfaces identiques, permet de constater que l'albédo diminue avec la hauteur des bâtiments.</p> <p>L'influence de l'hétérogénéité des matériaux : Des configurations urbaines de hauteur de bâtiments différentes peuvent avoir le même albédo effectif, pourvu que les matériaux urbains sont différents. De même, deux géométries de même hauteur peuvent ne pas avoir le même albédo effectif.</p>
<p>HAUTEUR SOLAIRE</p>  <p>Trajectoire du soleil aux latitudes moyennes 45°. www.meteorologic.net/climat-acteurs.php</p>		<p>L'albédo effectif subit des tendances de variation complexes et diverses en fonction de la hauteur solaire : Il peut diminuer ou augmenter en fonction des matériaux des façades, des toits et du sol.</p>
<p>L'ORIENTATION DU TISSU URBAIN</p>  <p>© AGSE - Droits réservés - www.scouts-europe.org Source : http://www.scoutorama.org/L-orientation-avec-le-soleil-et.html</p>		<p>Si l'albédo effectif est sensible à la course solaire, il doit être aussi sensible à l'orientation du tissu urbain. L'orientation est en quelque sorte un changement de l'exposition de la forme urbaine aux flux solaires incidents.</p>




L'EFFET DE LA MORPHOLOGIE URBAINE SUR LES CONTRIBUTIONS DES SURFACES URBAINES A L'ALBEDO EFFECTIF : TISSU PLOT				
LES FACTEURS INFLUENTS	FAÇADES	TOIT	SOL	OBSERVATIONS
<p>Densité surfacique</p>  <p>CHENG et al (2006).</p>	<p>D30%</p> 			<p>Sol : La baisse de la contribution est d'autant plus rapide que la densité est faible.</p> <p>Toits : L'augmentation des contributions est d'autant plus importante que la densité est faible.</p> <p>Façades : Les contributions des façades augmente depuis une densité supposée minimale jusqu'à la densité 30% puis baissent pour des densités plus élevées.</p>
<p>Hauteur des bâtiments</p>  <p>CHIMKLAI et al. (2004)</p>		<p>Façades verticale</p>  <p>Façades inclinées</p> 		<p>Sol : La régression est d'autant plus rapide que la densité urbaine est faible</p> <p>Façades : La variation des contributions est d'autant plus rapide que la densité est faible.</p> <p>Toits : La contribution des toits augmente si les façades sont verticales (GROLEAU). Elle peut diminuer en fonction de l'inclinaison des façades.</p>
<p>Angle d'inclinaison es façades</p>  <p>Figure 108: L'enveloppe solaire. BROWN et DEKEY. Sun, wind and light.</p>				<p>Sol : La variation est d'autant plus rapide que la densité est faible et que le nombre des façades inclinées est important.</p> <p>Toit : la baisse de la contribution est d'autant plus rapide que le nombre de façades inclinées est élevé et la densité est forte</p> <p>Façades : l'augmentation des contributions est d'autant plus rapide que le nombre des façades inclinées est important et la densité est forte (importance des façades).</p>
<p>Hauteur solaire</p>  <p>Figure 109: Trajectoire locale du soleil aux latitudes moyennes 45°. Source : www.meteorologic.net /climat-acteurs.php</p>				<p>Sol : L'augmentation est d'autant plus rapide que la densité urbaine est faible.</p> <p>Toit : Les contributions des toitures ne varient pas en fonction de la hauteur solaire.</p> <p>Façades : La variation des contributions des façades est d'autant plus rapide que la densité est faible.</p>

LES CONTRIBUTIONS SAISONNIERES DES FAÇADES A L'ABSORPTION : TISSU PLOT				
TENDANCES déc.→ mars→juin Hauteur solaire	CONTRIBUTIONS A L'ABSORPTION			OBSERVATIONS
	FAÇADES SUD			<p>Hiver et printemps : Les façades sud présentent les contributions d'hiver et de printemps les plus importantes. D'après les calculs de la matrice d'expériences, la marge des valeurs des contributions est estimée à 50-70%. (source de gains hivernaux importants).</p> <p>Eté : Les contributions estivales sont modestes (20-30%).</p>
	Hiver	Printemps	Eté	
	+++	++	+-	
	FAÇADES EST ET OUEST			<p>Hiver et printemps : Les contributions des façades est et ouest à l'absorption sont moins importantes, en comparaison avec celles des façades sud (15-30%).</p> <p>Eté : Les façades est et ouest jouent un rôle prépondérant dans les contributions estivales à l'absorption : D'après le calcul des contributions moyennes, chacune contribue de l'ordre de 25 à 40% à l'absorption au mois de juin, du fait de leur taux d'exposition solaire élevé. Ce sont les lieux du piégeage solaire estival.</p>
	Hiver	Printemps	Eté	
	-	+-	++	
	FAÇADES NORD			<p>Les contributions saisonnières des façades nord sont négligeables quel que soit les matériaux. (la marge des valeurs est comprise entre 0 et 10%, d'après les réponses moyennes de la matrice d'expériences).</p>
	Hiver	Printemps	Eté	
	---	---	-- -	

LE POIDS DES MATERIAUX DE FACADES DIFFEREMMENT ORIENTEES DANS L'ABSORPTION : TISSU PLOT			
POIDS DANS L'ABSORPTION			OBSERVATIONS
FAÇADES NORD			➤ La variation de l'albédo effectif est faiblement sensible aux matériaux des façades nord. Quel que soit la valeur de réflectivité des orientations nord, l'influence est toujours la même pour le mois de décembre, mars et juin.
Hiver	Printemps	Eté	
— — —	— — —	— — —	
FAÇADES SUD			➤ Les matériaux des façades sud influent beaucoup sur la variation de l'albédo durant la saison d'hiver. Durant le printemps, l'effet des matériaux s'estompe mais reste important. En été, l'effet est beaucoup plus amoindri. Ces propriétés s'adaptent aux caractéristiques saisonnières.
Hiver	Printemps	Eté	
+ + +	+ +	+	
FAÇADES EST ET OUEST			➤ les matériaux des orientations est et ouest du tissu plot influent sur la variation de l'albédo effectif. Cette influence est pareille quel que soit la saison. Par conséquent, les façades est et ouest s'adaptent mal au cycle saisonnier.
Hiver	Printemps	Eté	
+ -	+	+ +	

EFFET DE LA MORPHOLOGIE URBAINE, DE L'ORIENTATION ET DE LA VARIATION SAISONNIERE SUR L'ALBEDO EFFECTIF : CANYON NS ET EO					
FACTEURS	TENDANCES				OBSERVATIONS
DENSITE	CANYON_NS		CANYON_EO		L'albédo effectif des canyons NS et EO augmente de façon linéaire avec la densité
	↑		↑		
ANGLE D'INCLINAISON DES FAÇADES	FAÇ_EST	FAÇ_OUEST	FAÇ_NORD	FAÇ_SUD	<p>Canyon EO : l'inclinaison uniquement des façades est ou ouest contribue à la diminution de l'albédo effectif. L'inclinaison simultanée des deux façades présente un effet deux fois plus important : Les deux orientations de façades présentent donc le même poids.</p> <p>Canyon EO : l'inclinaison des façades nord fait baisser systématiquement l'albédo effectif avec des écarts régulier en fonction de la densité. L'inclinaison des façades sud provoque une augmentation de l'albédo pour la plage de densité 15-50%. Au delà de la densité 50%, l'albédo baisse avec l'angle d'inclinaison des façades sud.</p> <p>L'effet conjoint des deux façades nord et sud fait que l'albédo du canyon EO diminue, et que cette régression est d'autant plus importante que la densité est forte.</p>
	↓	↓	↓	D= 50% ↑ ↓	
	FAÇADES EST ET OUEST		FAÇADES NORD ET SUD		
					
HAUTEUR SOLAIRE	→		↓ ↑ →		<p>Canyon EO : L'albédo effectif du canyon EO peut fluctuer en fonction des saisons. Le sens de la variaino de l'abédo dépend de l'attribution des matériaux urbains. Certaines combinaisons contribueut à l'augemntation de l'abdorption durant les saisons froides. D'autres peuvent conduire à une diminution de l'bsorption urbaine en hivers.</p> <p>Canyon NS : l'albédo effectif ne manifeste aucune senibilité à la hauteur solaire, quel que soit le mode d'attribution des matériaux urbains. Nous avons expliqué ce phénomène du fait que, durant les journées du mois de décembre, mars et juin, les caractéristiques spatiales du canyon permettent d'avoir la même proportion du flux absorbé.</p>
L'ORIENTATION DU TISSU URBAIN	↓ ↑ →				Rien qu'en comparant les valeurs d'albédo effectif des cas des matrices correspondant au canyon EO et NS, nous déduisons que l'orientation influe sur l'absorption urbaine. L'albédo peut doubler dans certains cas.

EFFET DE LA MORPHOLOGIE URBAINE, SUR LES CONTRIBUTIONS DES SURFES A L'ALBEDO EFFECTIF : CANYON NS ET EO							
FACTEURS	TENDANCES DES CONTRIBUTIONS A L'ALBEDO						OBSERVATIONS
DENSITE	CANYON_NS			CANYON_EO			
	FAÇADES	TOIT	SOL	FAÇADES	TOIT	SOL	
	↓	↑	↓	↓	↑	↓	
ANGLE D'INCLINAISON DES FAÇADES	TOITS	SOL		SOL (inclin° sud)	SOL (inclin° nord)	TOI	
	↓	↓		↓ ↑ D= 50%	↑	↓	
							

LES CONTRIBUTIONS SAISONNIERES DES FAÇADES ET DU SOL A L'ABSORPTION : CANYON EO				
TENDANCES déc.→ mars→juin Hauteur solaire	CONTRIBUTIONS A L'ABSORPTION			OBSERVATIONS
	FAÇADES NORD			Les façades nord présentent les contributions à l'absorption les plus faibles parmi l'ensemble des façades du canyon EO.
	HIVER	PRINT.	ETE	
	---	---	---	
	FAÇADES SUD			<p>Hiver : Les contributions hivernales à l'absorption des façades sud à l'absorption sont importantes.</p> <p>Printemps : Les contributions commencent à baisser par rapport à la saison d'hiver.</p> <p>Eté : Les contributions estivales à l'absorption sont nettement inférieures à celles d'hiver. Ce comportement singulier procure aux orientations sud des façades un rôle stratégique important dans la modulation des gains, suivant les caractéristiques saisonnières.</p>
	HIVER	PRINT.	ETE	
	+++	++	+-	
	SOL			<p>Eté : Les contributions du sol à l'absorption ne peuvent être négligées en été, notamment quand le masque au sol du bâti est faible.</p> <p>Hiver : Les contributions hivernales sont faibles.</p>
	HIVER	PRINT.	ETE	
	---	+-	++	

L'EFFET DE LA REFLECTIVITE DES SURFACES SUR L'ABSORPTION : CANYON EO			
POIDS DANS L'ABSORPTION			OBSERVATIONS
FAÇADES NORD			L'effet de la variation de la réflectivité des façades nord est négligeable quel que soit la saison.
Hiver	Printemps	Eté	
---	---	---	
FAÇADES SUD			L'absorption urbaine aux mois de décembre et mars est très sensible aux matériaux des façades sud. On assiste à une ascension très rapide de l'absorption si la réflectivité des matériaux passe de 0.8 à 0.1. En été, l'influence des façades sud s'estompe.
Hiver	Printemps	Eté	
+++	++	+	
SOLS NORD ET SUD			Les matériaux des façades est et ouest influent faiblement sur la variation de l'absorption aux mois de décembre et mars. En été, les matériaux commencent à avoir de l'effet et peuvent contribuer fortement à l'absorption.
Hiver	Printemps	Eté	
---	-	+	

LES CONTRIBUTIONS SAISONNIERES DES FAÇADES ET DU SOL A L'ABSORPTION : CANYON NS																				
TENDANCES déc.→ mars→juin Hauteur solaire	CONTRIBUTIONS A L'ABSORPTION			OBSERVATIONS																
↓	FAÇADES EST			<p>Les plages de variation des valeurs des contributions des surfaces urbaines sont très proches, quel que soit la saison.</p> <p>Les matériaux des façades et du sol gardent la même influence sur les contributions saisonnières.</p> <table border="1"> <caption>Data for Contribution to Absorption Graph</caption> <thead> <tr> <th>Month</th> <th>sols Est (%)</th> <th>sols Ouest (%)</th> <th>façades Est (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Déc.</td> <td>15.0</td> <td>15.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>mars</td> <td>16.5</td> <td>16.5</td> <td>13.5</td> </tr> <tr> <td>juin</td> <td>17.5</td> <td>17.5</td> <td>12.0</td> </tr> </tbody> </table>	Month	sols Est (%)	sols Ouest (%)	façades Est (%)	Déc.	15.0	15.5	14.5	mars	16.5	16.5	13.5	juin	17.5	17.5	12.0
	Month	sols Est (%)	sols Ouest (%)		façades Est (%)															
Déc.	15.0	15.5	14.5																	
mars	16.5	16.5	13.5																	
juin	17.5	17.5	12.0																	
↓	FAÇADES OUEST																			
	Hiver	Printemps	Eté																	
↑	SOL																			
	Hiver	Printemps	Eté																	

L'EFFET DE LA REFLECTIVITE DES SURFACES SUR L'ABSORPTION :			
CANYON NS			
POIDS DANS L'ABSORPTION			OBSERVATIONS
FAÇADES EST			<p>➤ Toutes les surfaces urbaines du canyon NS présentent le même poids dans la variation de l'albédo effectif quel que soit la saison. L'influence des matériaux des surfaces est importante quelque soit la saison. (les courbes saisonnières des effets des matériaux urbains sont superposées).</p> <p>➤ Le canyon NS ne permet pas de statuer sur une bonne stratégie saisonnière d'attribution des matériaux car, la moyenne d'albédo pondéré dans la journée demeure constante quelque soit la date. Cependant, l'albédo horaire peut sensiblement fluctuer en fonction de l'hétérogénéité des matériaux de surfaces horizontales et verticales : Les flux solaires ne voient pas les mêmes surfaces, et donc les mêmes matériaux durant la course solaire diurne.</p> <p>➤ Nous pouvons déduire que l'orientation EO se prête mieux à l'application d'une stratégie saisonnière d'attribution des matériaux aux surfaces urbaines.</p>
Hiver	Printemps	Eté	
+++	+++	+++	
FAÇADES OUEST			
Hiver	Printemps	Eté	
+++	+++	+++	
SOLS EST ET OUEST			
Hiver	Printemps	Eté	
+++	+++	+++	

BIBLIOGRAPHIE

AIDA, M. (1982). Urban albedo as a function of the urban structure: A model experiment (Part I). *Boundry Layer Meteorology* (23) , 405-413.

AIDA, M., & GOTOH, K. (1982). Urban albedo as a fuction of the urban structure: A two dimensional numerical simulation (Part II). *Boundry Layer Meteorology* (23) , 415-424.

ALEXIS, P. (2008, décembre). *Aux plans d'expériences efficaces*. Retrieved Aout 2009, from www.plan-experiences-alexis.com: <http://plan-experiences-alexis.com/WordPress>

ATHAMENA, K. (2008). *Indicateur pour l'analyse de la contribution d'un projet urbain à l'ilot de chaleur*. Mémoire du Master STEU, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, Nantes.

BONNEAU, F. (2004). *Ventillation naturelle de l'habitat dans les villes tropicales: Conditions à l'élaboration d'outils d'aide à la conception*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes.

BOUGIATIOTI, F. (2006). Effect of urban geometry on surface temperatures of skin materials in Greek cities. *The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, (p. 6). Genève, Suisse.

BROWN, G. Z., & DEKEY, M. (2001). *Sun, wind and light: Architecture design strategies*. (J. W. sons, Ed.)

CAPELUTO, G., YEZIORO, A., BLEIBERG, T., & SHAVIV, E. (2006). Solar right in the design of urban spaces. *PLEA2006, The Conference on Passive and Low Energy Architecture*, (p. 4). Genève, Suisse.

CHENG, V., STEEMERS, K., MONTAVON, M., & COMPAGNON. (2006). Urban form, density and solar potential. *PLEA2006, The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, (p. 6). Genève, Suisse.

CHERQUI, F., WURTZ, E., GROLEAU, G., & ALLARD, F. (2005). A step towards the global assesment of district projects: Solar indicators and way to quantify them. In N. I. Conference (Ed.), *Building Simulation*, (pp. 167-174). Montréal.

CHIMKALI, P., HAGISHIMA, A., & TANILOTO, J. (2004). A computer system to support albedo calculation in urban areas. 11.

- COHEN, M. R., & SMALL, L. (n.d.). *Diffuse reflectance Measurements of standard diffusers*. Retrieved septembre 2009, from 4physics: <http://www.4physics.com/tn3/lambertian.htm>
- DOS SANTOS, J. C., SICHIERI, K., & CARAM, R. M. (2003). Determination of referencetransparent materials for solar heat gains calculation. *PLEA2003, The 20th Conference of Passive and Low Energy Architecture*, (p. 5). Santiago, Chili.
- FLORY-CELINI, C., VIRGONE, D., & COVALET, D. (2006). Influence des masques solaires sur l'éclairément reçu par une façade. *Congrès Français de Thermique*, (p. 6). Ile de Ré.
- FLORY-CELINI, C., VIRGONE, J., & COVALET, D. (2006). Etude de l'influence d'un bâtiment voisin sur les éclairéments énergétiques et lumineux reçus par un vitrage. p. 6.
- GROLEAU, D. (2008). *Analyse de la variation de l'albédo effectif urbain en fonction de la densité construite et de la forme urbaine*. Nantes.
- KNOWLES, R. L. (1999). The solar envelope. 10. California.
- KONDO, A., UENO, M., & A., K. (2001). The influecne of the urban canopy configuration on urban albedo. *Boundry Layer Meteorology* , 225-242.
- LARSEN, S. F., & LESINO, G. (2003). Performance of different translucent materials used in buildings covers. *PLEA2003, The Conference of Passive and Low Energy Architecture*, (p. 6). Santiago, Chili.
- LEUNG, K. S., & STEEMERS, K. (2008). Estimating average sky view factors of urban surfaces with simple geometric parameters. *PLEA2008, The 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, (p. 5). Dublin.
- LITTELEFAIR, J. P. (1987). Prediction of reflected solar dazzle from sloping facades. *Building and Environment* , 22 (4), 385-291.
- MUSY, M. (2008). Microclimat: Principes physiques, échelles et modélisations. *Cours du Master STEU* . Nantes.
- OKE, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Energy and Buildings* , 237-254.
- OKE, T. R. (1988). Streetdesign and urban canopy layer calimate. *Energy and Buildings* , 11, 103-113.
- OKEIL, A. (2004). In search for energy efficient urban forms: The Residential Solar Block. *Proc. of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction Conference*, (p. 10). Toronto, Canade.

- PAWLAK, W. M., & SIEDLECKI, M. (2003). Radiation temperatures of the different vertical surfaces of the buildings in Lodz. *Fifth International Conference on Urban Climate*, (pp. 237-240). Lodz.
- PAWLAK, W., & FORTUNIAK, K. (2003). Application of physical model to study effective albedo of the urban canyon. *Fifth International Conference on Urban Climate*, (pp. 233-236). Lodz.
- PEDERIT, M. B., & DE HERDE, A. (2003). Influence of material in the reflection of light. In T. C. PLEA 2003 (Ed.), (p. 5). Santiago, Chili.
- PUCAR, C. (2006). Effect of reflection of sunlight on illuminance and energy gain of greenhouses. *PLEA2006, the 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, (p. 6). Genève, Suisse.
- RATTI, C., RAYDAN, D., & STEEMERS, K. (2003). Building form and environmental performance: Archetypes, analysis and arid climate. *Energy and Buildings*, 35 (1), 49-59.
- SANTAMOURIS, & al. (2001). *Energy and climate in the urban built environment*. (J. a. James, Ed.) London.
- TERJUNG, W. H., & STELLA, L. (1973, Juin). Solar radiation and urban heat islands. (J. F. Hart, Ed.) *The Annals of the Association of American Geographers*, 63 (2), pp. 181-207.
- TOUDERT, F. T., & MAYER, H. (2005). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 94-108.

TABLE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Les contributions des surfaces urbaines à l'albédo effectif à 11H, pour une géométrie de densité 30% et de pourcentage de surfaces de façades 20%. GROLEAU (2008).....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 2 : Les contributions des surfaces urbaines à l'albédo effectif à 11H, pour une géométrie de densité 30% et de pourcentage de surfaces de façades 50%. GROLEAU (2008).....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 3 : Les contributions des surfaces urbaines à l'albédo effectif à 11H, pour une géométrie de densité 30% et de pourcentage de surfaces de façades 80%. GROLEAU (2008).....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 4 : La mesure des écarts maximums de température (Max DT) et des pics de température (Max peak DT) des revêtements des trottoirs et de la chaussée, pour différentes orientations de rues à Athènes. SANTAMOURIS et al. (2001).</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 5 : Un extrait du tableau récapitulatif de la variation de l'albédo moyen et de l'absorption en fonction de l'irrégularité de la forme urbaine. AIDA (1982).....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 6 : Les moyennes de l'albédo effectif mesurées sur l'année et les taux d'absorption pour différents modèles géométriques (AIDA 1982).....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 7 : L'étude de variation de l'albédo effectif (au solstice d'été à midi, latitude 35°N) de six géométries en fonction de la densité et du facteur de vue de ciel. KONDO (2001).....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 8 : Les valeurs saisonnières d'albédo effectif calculées par Solène pour des configurations urbaines différentes. GROLEAU (2008).....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 9 : La variation de l'albédo effectif pour des configurations plot orientées NS et NE/SO pour différentes valeurs de densité et de %SF. GROLEAU (2008).....</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 10 : Le calcul des valeurs de l'albédo effectif de six cas urbains de dimensions et densités différentes, pour deux latitudes 35° et 45°N à midi. GROLEAU (2008).....</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 11 : Albédo de matériaux urbains couramment utilisés dans le revêtement de façades. Source : ATHAMENA (2008)</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 12 : Albédo de peintures cellulosiques couramment utilisés au niveau des façades. Source : ATHAMENA (2008)</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 13 : Albédo de matériaux urbains couramment utilisés dans le revêtement du sol. Source : ATHAMENA (2008).....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 14 : Albédo de matériaux urbains couramment utilisés au niveau des toitures. Source : ATHAMENA (2008).....</i>	<i>61</i>

Tableau 15: Les valeurs de réflectivité des façades et du sol, utiles pour l'élaboration de la matrice d'expériences.....	63
Tableau 16: Calcul de l'albédo effectif sur la zone d'analyse et celle de simulation pour une géométrie de hauteur 15m et de dimension de la trame urbaine de 4bât/ha.....	66
Tableau 17: Calcul d'albédo effectif le 21/12 pour une géométrie urbaine de hauteur 15m et de façades verticales. Latitude 45°N.	69
Tableau 18: Exemple de facteurs à faire varier ainsi que leurs niveaux ou modalités pour l'élaboration d'une matrice d'expériences simple.	77
Tableau 19: Calcul de l'albédo effectif le 21/12 pour différents modèles géométrique de type plot, en fonction de l'orientation. La densité étant de 60%, la hauteur de 20m et l'angle d'inclinaison est de 20°.....	81
Tableau 20: Tableau des facteurs et des niveaux des deux matrices M1 et M2, utilisées pour l'étude de l'effet de la morphologie urbaine sur l'albédo effectif.....	82
Tableau 21: A gauche, la matrice qui intègre les quatre premiers niveaux de densité 15, 20, 30 et 50%. A droite, celle qui intègre le reste des niveaux de densité (50, 60, 70 et 80%).	83
Tableau 22: Calcul de l'albédo effectif des seize cas de chaque matrice (M1 et M2).....	84
Tableau 23: Les réponses moyennes (Albédos effectifs moyens) de chaque niveau d'un facteur donné, correspondant aux deux matrices d'expériences M1 et M2.....	85
Tableau 24: Le calcul des valeurs horaires d'albédo effectif pour les deux dates du 21 décembre et 21 juin. Cas simulé plot N°13 de la matrice 2 (2 façades inclinées de 25°, la densité est de 50% et la hauteur des bâtiments est de 20m).	87
Tableau 25: Le calcul des valeurs horaires d'albédo effectif pour les deux dates du 21/12 et 21/06. Cas simulé plot N°9 de la matrice 2 (4 façades inclinées de 20°, la densité est de 50% et la hauteur des bâtiments est de 15m).	88
Tableau 26: Calcul de l'albédo effectif le 21/12 pour chaque configuration urbaine de densité D donnée, en fonction de l'angle d'inclinaison des façades. La hauteur des modèles étant de 15m.	92
Tableau 27: Les valeurs des contributions des sols à l'albédo effectif (matrices M1 et M2).....	98
Tableau 28: Tableaux des valeurs des contributions du sol à l'albédo effectif (matrices M1 et M2).	101
Tableau 29: Les valeurs des contributions des façades du modèle plot à l'albédo effectif (matrices M1 et M2).....	104

Tableau 30: Calcul de l'albédo effectif pour des géométries de densité volumique identique, mais de densité surfacique et de hauteur différentes. La géométrie de référence étant de densité 15% et de hauteur 15m.	108
Tableau 31: Calcul de l'albédo effectif pour des géométries de densité volumique identique, mais de densité surfacique et de hauteur différente. La géométrie de référence étant de densité 80% et de hauteur 15m.	108
Tableau 32: Les valeurs de réflectivité des façades et du sol servant à la constitution de la matrice d'expériences pour l'étude des matériaux urbains du tissu Plot.	109
Tableau 33: La matrice d'expériences d'attribution des matériaux urbains aux surfaces des façades et du sol. Vingt sept combinaisons physiques au total (tissu Plot).	110
Tableau 34: Les valeurs d'albédo effectif des vingt sept cas d'étude de la matrice d'expériences du modèle Plot.	111
Tableau 35: L'effet moyen de la réflectivité des façades sur leurs contributions à l'absorption solaire	118
Tableau 36: Matrice d'expériences pour l'étude de l'effet des facteurs morphologiques sur l'albédo effectif. Marge de densité 15-50% (tissu canyon).....	125
Tableau 37: Les contributions des surfaces urbaines du canyon EO à l'albédo effectif le 21/12, en fonction de la densité urbaine (H=15m).	129
Tableau 38: Valeurs des contributions des surfaces urbaines du canyon NS à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité (H=15m).....	134
Tableau 39: Valeurs de réflectivité des surfaces urbaines du canyon EO.....	138
Tableau 40: La matrice d'expériences illustrant les 27 combinaisons physiques pour le calcul de l'albédo effectif du canyon EO.....	138
Tableau 41: Calcul des valeurs d'albédo effectif des 27 combinaisons physiques du canyon EO.....	139
Tableau 42: Les effets moyens des niveaux de la densité et de la hauteur du canyon EO.....	139
Tableau 43: Les 27 combinaisons physiques du canyon NS pour le calcul de l'albédo effectif.	147
Tableau 44: Les valeurs d'albédo effectif des 27 combinaisons physiques du canyon NS.....	148

TABLE DES FIGURES

<p>Figure 1 : La variation du facteur solaire relatif (SHF_{rel}) d'un vitrage ordinaire (à gauche) et d'un vitrage traité (à droite) en fonction de l'angle d'incidence ($IncAng$). J.C.P. dos SANTOS et al. (2003).....</p>	18
<p>Figure 2 : Coupe sur la paroi du polycarbonate d'angle sélectif. LARSEN et LESINO (2003).....</p>	18
<p>Figure 3 : Vitrage en polycarbonate d'angle sélectif, avec illustration des paramètres solaires et géométriques de la paroi. LARSEN et LESINO. (2003).....</p>	19
<p>Figure 4 : La variation de la transmission du polycarbonate traité ($\lambda = 632.8nm$) en fonction de l'angle d'incidence pour $\gamma = 90^\circ$. LARSEN et LESINO (2003).....</p>	20
<p>Figure 5 : La variation de la transmission d'un vitrage simple en fonction de l'angle d'incidence. LARSEN et LESINO (2003).....</p>	20
<p>Figure 6 : Mesures de moyennes horaires de transmission énergétique pour différents matériaux translucides pour les saisons d'été (21 décembre) et d'hiver (21 juin).Latitude 24°Sud LARSEN et LESINO (2003).....</p>	20
<p>Figure 7 : Fraction diurne d'énergie solaire transmise pour différents matériaux translucides durant l'année. LARSEN et LESINO (2003).....</p>	21
<p>Figure 8 : Le flux lumineux incident et l'angle polaire de l'énergie diffuse par la surface. COHEN et SMALL. Source: http://www.4physics.com/tn3/lambertian.htm.....</p>	22
<p>Figure 9 : L'effet des caractéristiques réfléchives des surfaces sur leur comportement optique, en fonction de l'angle d'incidence lumineux mais aussi de l'intensité de la source. PIDERIT et DE HERDE (2003).....</p>	22
<p>Figure 10 : La variation de l'albédo effectif en fonction de l'angle zénithal solaire, selon trois caractéristiques réfléchives de surface. AIDA (1982).....</p>	23
<p>Figure 11 : La géométrie d'étude des gains solaires reçus pas la façade nord avec masque et sans masque (vis-à-vis). FLORY-CELINI et al. (2006).....</p>	23
<p>Figure 12 : La variation des gains estivaux de la façade nord en fonction de la réflectivité du sol. C. FLORY-CELINI et al (2006).....</p>	24
<p>Figure 13 : Le quartier d'étude des flux réfléchis, après les inter-réflexions. CHERQUI et al. (2005).....</p>	24
<p>Figure 14 : La proportion du flux réfléché par rapport au flux global incident reçu par les façades nord. CHERQUI et al. (2005).....</p>	24

Figure 15: La variation annuelle du rapport « flux global incident après réflexions sur le flux total avant toutes réflexion ». K-n et I-n désignent respectivement les façades nord des bâtiments K et I. CHERQUI et al. (2005).....	25
Figure 16: La variation de la proportion du flux réfléchi reçu par les façades Sud en fonction de la réflexion des façades (à gauche) et du sol (à droite). CHERQUI et al. (2005).....	25
Figure 17: Un exemple parmi les rues canyon expérimentées orientées NO/SE. Les mesures de la température de surface au niveau de 5 points de la surface du sol (a, b, c, d et e). SANTAMOURIS et al. (2001).	27
Figure 18: Les groupes de façades utilisés pour la simulation du rayonnement thermique. PAWLAK et SIEDLECKI (2003).....	29
Figure 19: La variation de la température de rayonnement des surfaces verticales en fonction de la température d'air, pour des orientations et des matériaux différents. PAWLAK et SIEDLECKI (2003).....	30
Figure 20: La variation diurne de la température d'air T_a à 1.2 m du sol pour des rues canyon orientées N-S et E-O et pour différents ratio H/W. Latitude 32°N. TOUDERT (2004).	30
Figure 21: Les modèles géométriques utilisés pour la mesure de l'absorption solaire. AIDA (1982).	30
Figure 22: La variation de l'albédo effectif en fonction du couple (densité / %SF) pour deux configurations urbaines de même hauteur ($H = 6m$) mais de tramage urbain différent, 1bat/ha et 10bat/ha. GROLEAU (2008).....	32
Figure 23: Les modes de distribution de la hauteur des bâtiments dans le tissu urbain. CHENG et al. (2006).....	32
Figure 24: La variation diurne (au mois de juin) de l'albédo effectif de six modèles de type « plot », de hauteurs différentes. La densité étant la même pour tous les cas. KONDO (2001).....	33
Figure 25: Une configuration urbaine de distribution de hauteur de bâtiments non uniforme. KONDO (2001).....	34
Figure 26: Le modèle numérique utilisé pour l'estimation de l'impact de la hauteur de la canopée urbaine sur l'albédo effectif. KONDO (2001).....	34
Figure 27: La variation diurne de l'albédo effectif pour différentes distributions de hauteur de bâtiments. KONDO (2001).....	34
Figure 29: Le calcul de l'albédo effectif pour deux tissus urbains de valeurs de ratio $W2/W1$ différents. AIDA (1982).....	35
Figure 28: L'effet du ratio $W2/W1$ sur la variation de l'albédo effectif en fonction de l'angle zénithal solaire. AIDA et GOTOH (1982).....	35

Figure 30: La variation d'albédo en fonction du ratio $W1/W2$ pour différents angles solaires. AIDA et GOTOH (1982).....	36
Figure 31: La variation de l'albédo effectif de six géométries de même hauteur 25m mais de densités différentes. KONDO (2001).....	37
Figure 32: La variation d'albédo effectif en fonction de la densité et du pourcentage de surface des façades (%SF), avec le tracé des courbes de hauteur. Tissu de type PLOT, 1bat/ha. GROLEAU (2008).....	37
Figure 33: La variation de l'albédo effectif en fonction du pourcentage de surface des façades, et de la densité du tissu canyon, avec le tracé des courbes de hauteur. GROLEAU (2008).....	38
Figure 34: Caméra de champ de vision hémisphérique (180° pour l'estimation du facteur de vue de ciel (à gauche). A droite, une image réalisée par la technique « œil du poisson ». Source : http://www.csbat.net/equipe/t03_geometrie.htm	39
Figure 35: Illustration du facteur de vue de ciel d'un quartier. Simulation par Solène. CHERQUI et al. (2005).....	40
Figure 36: Le rayonnement GLO dissipé en dehors du canyon urbain à Vancouver en fonction du facteur de vue de ciel (ψ_s). Les moyennes de mesures sont prises du 9 et 10 Septembre 1973, d'après NUNEZ, 1974.....	40
Figure 37: L'intensité d'ilot de chaleur nocturne en fonction du facteur de vue de ciel (ψ_s), en corrélation avec le ratio H/W. OKE (1981).....	41
Figure 38: Configuration PLOT et Configuration CANYON. GROLEAU (2008).....	42
Figure 39: L'angle zénithal, la hauteur solaire et l'azimut solaire. Source: http://www.srrb.noaa.gov	43
Figure 40: La variation diurne de l'albédo effectif pour les deux journées du 3décembre et 15 juin. AIDA (1982).....	44
Figure 41: La variation de l'albédo effectif en fonction de l'angle zénithal solaire. AIDA (1982).....	45
Figure 42: La variation saisonnière de l'albédo effectif pour une surface horizontale (a), un modèle canyon NS (b) et un modèle canyon EO (c).PAWLAK et FORTUNIAK (2003).....	46
Figure 43: La méthode de lancé des photons « photon tracking method » par le modèle MONTE CARLO. PAWLAK et FORTUNIAK (2003).....	46
Figure 44: La variation journalière de l'albédo effectif de différents modèles en hivers 2002/2003 et au printemps 2003, à Lodz (Pologne). PAWLAK et FORTUNIAK. (2003).....	46

Figure 45: Les configurations géométriques utilisées pour l'estimation de l'effet de l'orientation du tissu urbain sur l'albédo effectif. Kondo (2001).....	48
Figure 46: La variation diurne, au mois de juin et pour une latitude 35°N, de l'albédo effectif pour différentes orientations de rue. KONDO (2001).....	48
Figure 47: Illustration de la géométrie du masque pour le tissu plot et canyon. L'étendue du masque.....	64
Figure 48: Les zones de simulation correspondant au tissu plot et canyon.....	65
Figure 49: Les zones centrales de calcul de l'albédo effectif correspondant au tissu plot et canyon.....	65
Figure 50: La tendance de variation de l'albédo effectif en fonction de la densité. Calculs effectués sur les deux zones de simulation et d'analyse. La géométrie test étant de hauteur H=15m et de façades verticales.....	66
Figure 51: A droite: vue en deux dimensions de l'angle du ciel visible par un élément de contour situé au centre de la rue canyon. A gauche: vue en 2D du domaine visible en dehors de la scène (ciel) par la façade latérale gauche du canyon.	68
Figure 52: La tendance de variation de l'albédo effectif selon les deux méthodes de calcul du réfléchi vers le ciel. Géométrie simulée de hauteur 15m.....	69
Figure 53: Schéma en 2D montrant les deux surfaces absorbante et réfléchissante du canyon objet d'étude.....	70
Figure 54: Illustration de la géométrie masque (canyon), de la zone de simulation (150m de longueur, 25m de largeur et 40m de hauteur) et de la zone de calcul de l'albédo effectif, pour la vérification de la méthode de calcul qui pondère les flux réfléchis par chaque contour par son facteur de vue de ciel.	71
Figure 55: Promouvoir le mode de fabrication d'un produit. Etude des facteurs à contrôler. Source : http://plan-experiences-alexis.com	76
Figure 56: Matrice de cinq facteurs à quatre niveaux. Source: http://plan-experiences-alexis.com	77
Figure 57: Exemple d'un graphique illustrant les effets des facteurs: «densité, hauteur, inclinaison et nombre de façades inclinées sur la variation de l'albédo effectif.....	79
Figure 58: Un exemple de modèle de type plot illustrant les contraintes d'inclinaison des façades (inclinaison affichée étant de 25°, la densité est de 15% et la hauteur est de 20m.....	82
Figure 59: Tendance de variation saisonnière de l'albédo effectif du tissu plot: Albédo de surface homogène.....	85

Figure 60: Modèle type Plot d'angle d'inclinaison des façades 20°, de densité urbaine 20% et de hauteur 20m. Descripteurs affichés : à gauche, énergie réfléchie vers le ciel le 21_06 à 12H. A droite, énergie réfléchie vers le ciel le 21_12 à 12H	86
Figure 61: Modèle type Plot d'angle d'inclinaison des façades 25°, de densité urbaine 50% et de hauteur 20m. Descripteurs affichés : à gauche, énergie réfléchie vers le ciel le 21_06 à 5H. A droite, énergie réfléchie vers le ciel le 21_06 à 12H	86
Figure 62: Tendances de variation diurne de l'albédo effectif le 21/12 et le 21/06. Cas N°13 de la matrice M2.	87
Figure 63: Modèle type Plot d'angle d'inclinaison des façades 20°, de densité urbaine 50% et de hauteur 15m. Descripteurs affichés : à gauche, énergie réfléchie vers le ciel le 21/06 à 5H. A droite, énergie réfléchie vers le ciel le 21/06 à 12H.	88
Figure 64: Tendances de variation diurne de l'albédo effectif le 21/12 et le 21/06. (Cas N°9 de la matrice M2)	89
Figure 65: L'effet de la hauteur de la canopée urbaine sur l'albédo effectif. (Tissu Plot, albédo de surface homogène).....	89
Figure 66: L'effet de la densité urbaine sur l'albédo effectif pour la plage de densité 15-50%.....	90
Figure 67: L'effet de la densité urbaine sur l'albédo effectif pour la plage de densité 50-80% (tissu plot, albédo homogène).	90
Figure 68: L'effet de l'inclinaison des façades sur la variation de l'albédo effectif du tissu plot, le 21/12, pour deux plages de densité différentes.	91
Figure 69: Mode de représentation graphique N°1 de l'effet de l'inclinaison des façades sur l'albédo effectif du modèles plot, le 21/12.	93
Figure 70: Mode de représentation graphique N°2 de l'effet de l'inclinaison des façades sur l'albédo effectif du modèles plot, le 21/12.	93
Figure 71: Mode de représentation graphique N°3 de l'effet de l'inclinaison des façades sur l'albédo effectif du modèles plot, le 21/12.	94
Figure 72: Effet de la variation de l'angle d'inclinaison des façades et du nombre des façades inclinées par bâtiment sur l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.....	94
Figure 73: Les courbes de variation de l'albédo effectif sans et avec prise en considération dans la matrice des valeurs intermédiaires de densité 20 et 30%.	97
Figure 74: L'effet du cycle saisonnier sur la contribution du sol à l'albédo effectif (tissu Plot).	99
Figure 75: L'effet des facteurs morphologiques sur la contribution de la surface du sol à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.	99

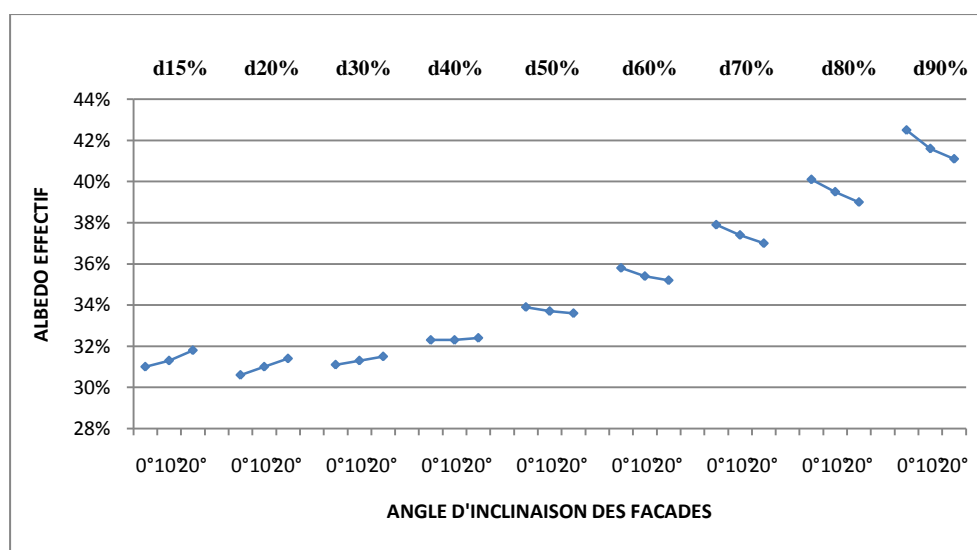
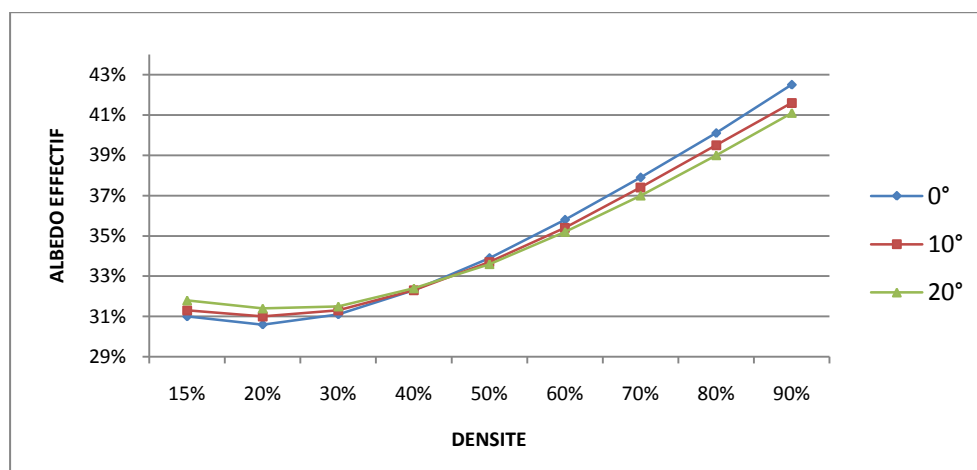
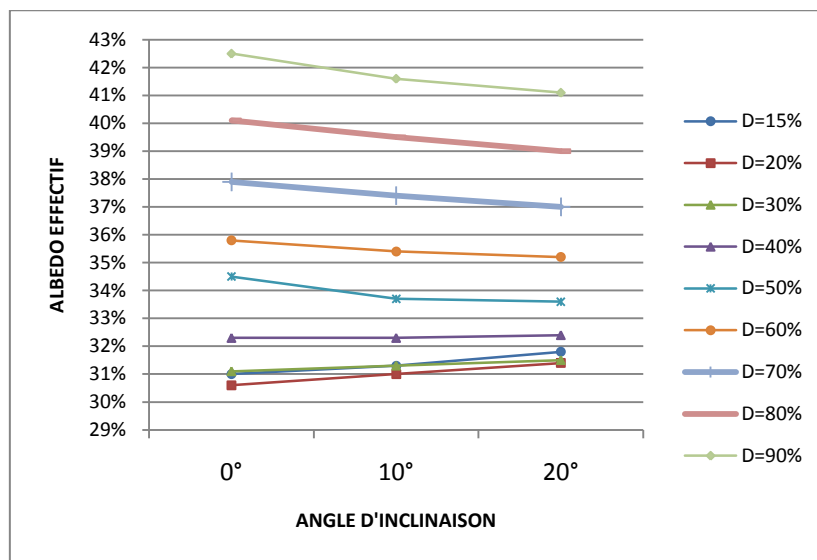
Figure 76 : L'effet de l'inclinaison des façades sur la contribution du sol à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.....	101
Figure 77 : L'effet des facteurs morphologiques sur la contribution des toits à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.....	102
Figure 78 : L'effet de l'inclinaison des façades sur la contribution des toits à l'albédo effectif: tissu plot.....	103
Figure 79 : L'effet de la variation saisonnière sur la contribution des toits à l'albédo effectif du modèle plot.....	104
Figure 80 : L'effet des facteurs morphologique sur la contribution des façades à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.....	105
Figure 81 : L'effet de la hauteur des bâtiments sur la contribution des façades à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.....	105
Figure 82 : L'effet de l'inclinaison des façades sur leur contribution à l'albédo effectif du modèle plot, le 21/12.....	107
Figure 83 : Géométries de densité 15 et 80% (4 façades inclinées de 20°) avec pour chacune deux formes de densité volumique équivalente.	107
Figure 84 : Les effets de la hauteur de la canopée urbaine et de la densité surfacique sur la variation saisonnière de l'albédo effectif, pour un albédo de surface hétérogène.....	112
Figure 85 : L'effet de la réflectivité des façades N, S, E et O sur la variation de l'albédo effectif du tissu plot.	116
Figure 86 : L'effet de la réflectivité du sol sur la variation de l'albédo effectif du tissu plot.....	117
Figure 87 : La variation saisonnière des contributions des façades N, S, E et O à l'albédo effectif (tissu plot).....	119
Figure 88 : L'effet de la réflectivité des façades sur leurs contributions à l'absorption de la totalité des façades (tissu plot).....	119
Figure 89 : L'effet de l'inclinaison des façades sud du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif le 21/12, en fonction de la densité (H=15m).	127
Figure 90 : L'effet de l'inclinaison des façades nord du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité (H=15m).....	127
Figure 91 : L'effet de l'inclinaison des façades nord et sud du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif le 21/12, pour des valeurs de densité différentes (H=15m).	128

Figure 92: L'effet de l'inclinaison des façades est du canyon NS sur la variation de l'albédo effectif le 21/12, pour différentes valeurs de densités (H=15m).....	128
Figure 93: L'effet de l'inclinaison des façades est et ouest du canyon NS sur la variation de l'albédo effectif le 21/12, pour différentes valeurs de densité (H=15m).	129
Figure 94: Les tendances de contribution des surfaces urbaines du canyon EO à l'albédo effectif le 21/12, en fonction de la densité urbaine (H=15m).....	130
Figure 95: Les tendances de contribution des toits du canyon EO à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité urbaine, pour différents angles d'inclinaison des façades nord et sud. (H=15m).	131
Figure 96: Les tendances de contribution des façades du canyon EO à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité urbaine pour différents angles d'inclinaison des façades nord et sud. (H=15m).	132
Figure 97: Les tendances de contribution du sol du canyon EO à l'albédo effectif en fonction de la densité urbaine, pour différents angles d'inclinaison des façades nord et sud. (H=15m).....	133
Figure 98: Les tendances de contribution des surfaces urbaines du canyon NS à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité (H=15m).....	134
Figure 99: Les tendances de variation des contributions des toits du canyon NS à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité, pour différents angles d'inclinaison des façades E et O. (H=15m).....	135
Figure 100: Les tendances de variation des contributions des façades du canyon NS à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité, pour différents angles d'inclinaison des façades E et O (H=15m).....	136
Figure 101: Les tendances de variation des contributions du sol du canyon NS à l'albédo effectif le 21/12 en fonction de la densité, pour différents angles d'inclinaison des façades E et O (H=15m).....	137
Figure 102: L'effet de la réflectivité des surfaces urbaines du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif.....	142
Figure 103: La variation saisonnière des contributions des surfaces urbaines du canyon EO à l'absorption.....	145
Figure 104: L'effet de la réflectivité des matériaux urbains du canyon EO sur les contributions des surfaces urbaines à l'absorption.....	146
Figure 105: L'effet de la réflectivité des surfaces urbaines du canyon NS sur l'absorption.....	149
Figure 106: La variation saisonnière des contributions des surfaces urbaines du canyon NS à l'absorption.	150

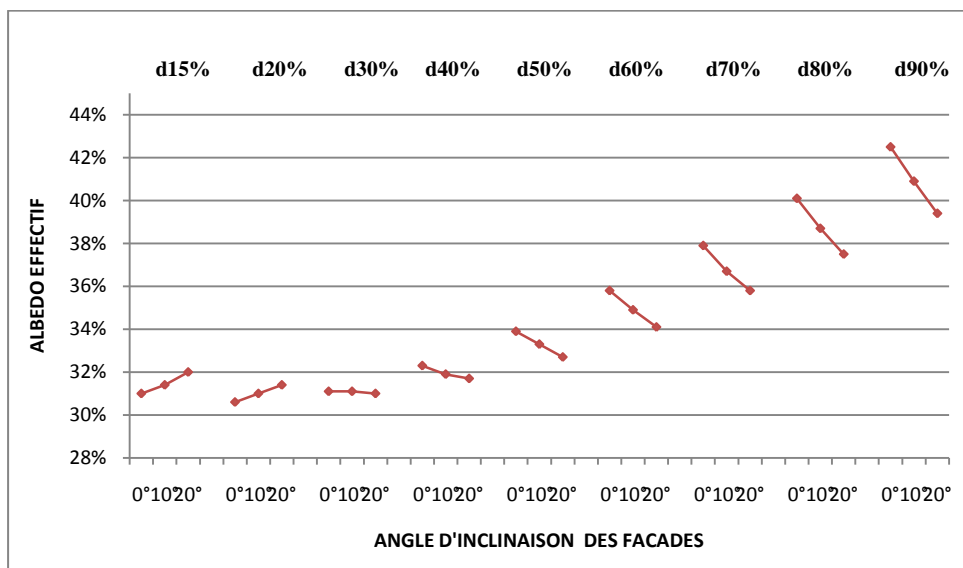
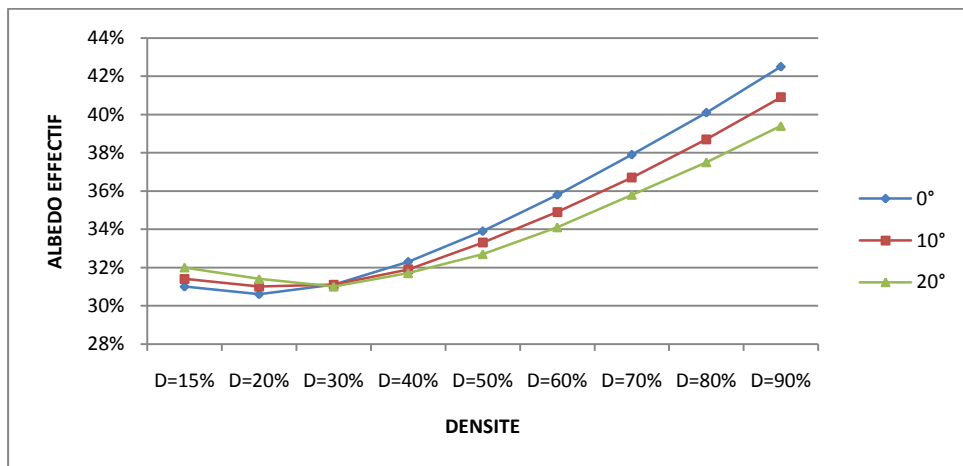
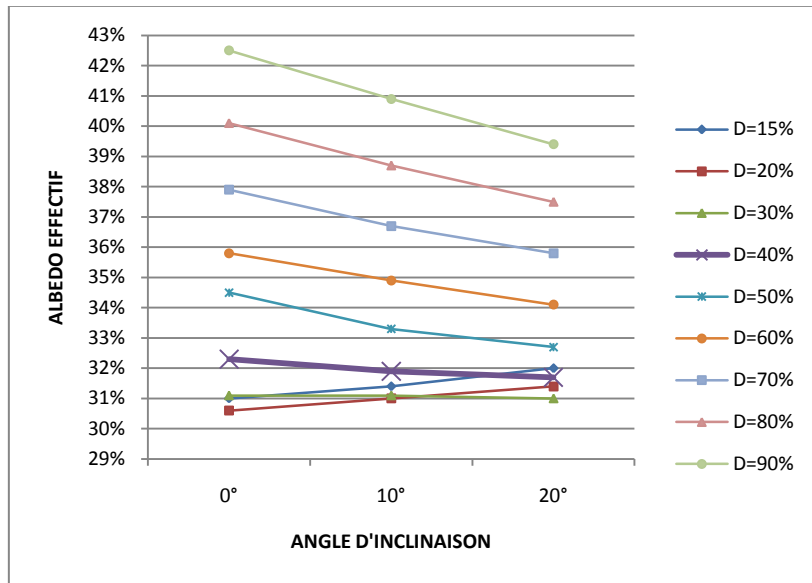
<i>Figure 107: L'effet de la réflectivité des surfaces urbaines du canyon NS sur les contributions des surfaces à l'absorption.....</i>	<i>151</i>
<i>Figure 108: Forte densité pour une distribution de hauteur uniforme. CHENG et al (2006).</i>	<i>163</i>
<i>Figure 109: Distribution de la hauteur des bâtiments. CHIMKLAI et al. (2004).....</i>	<i>163</i>
<i>Figure 110: L'enveloppe solaire. BROWN et DEKEY. Sun, wind and light.</i>	<i>163</i>
<i>Figure 111: Trajectoire locale du soleil aux latitudes moyennes 45°.Source :www.meteorologic.net/climat-acteurs.php</i>	<i>163</i>

ANNEXES

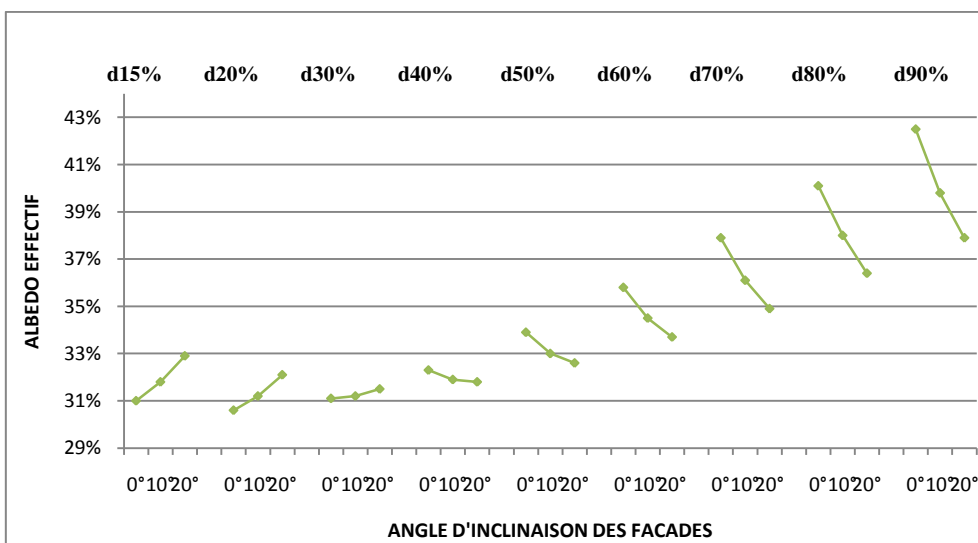
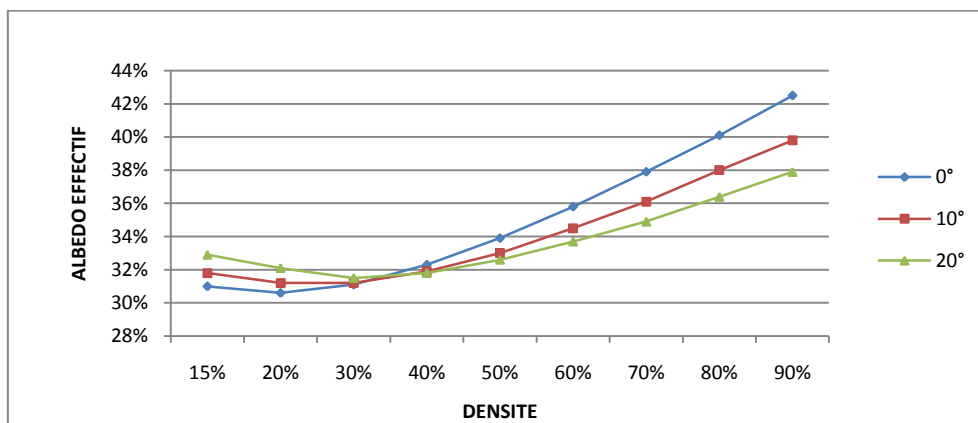
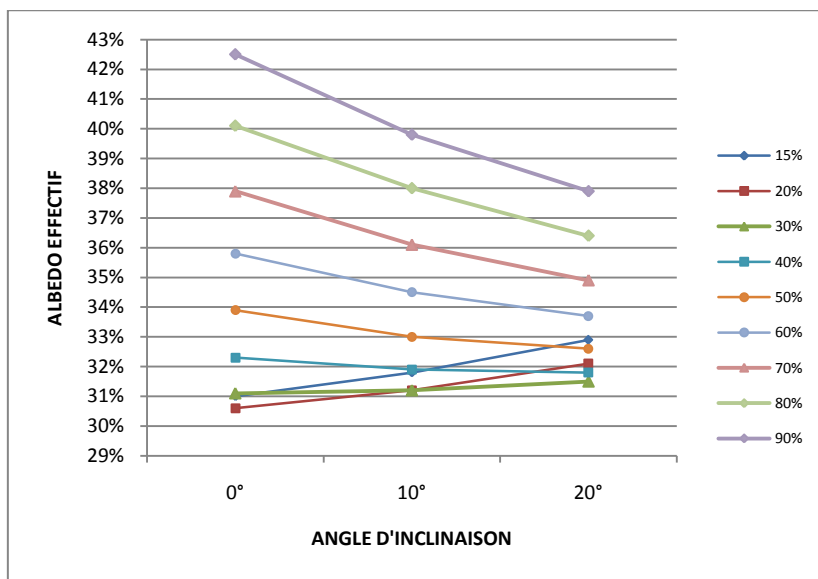
ANNEXE1 : Trois modes de représentation de l'effet de l'inclinaison des façades du modèle Plot, sur la variation de l'albédo effectif pour différentes valeurs de densité (modèle 1F : une façade inclinée par bâtiment)



ANNEXE2 : Trois modes de représentation de l'effet de l'inclinaison des façades du modèle Plot, sur la variation de l'albédo effectif pour différentes valeurs de densités (modèle 2F : deux façades inclinées par bâtiment)



ANNEXE3 : Trois modes de représentation de l'effet de l'inclinaison des façades du modèle Plot, sur la variation de l'albédo effectif pour différentes valeurs de densité (modèle 3F : trois façades inclinées par bâtiment)



ANNEXE3 : Calcul des effets moyens des facteurs morphologiques du modèle plot sur les contributions du sol à l'albédo effectif

Matrice M1		Déc.	Mars	Juin
Niveaux de H	H=5m	54,40%	60,70%	62,98%
	H=10m	39,43%	49,35%	54,08%
	H=15m	38,08%	45,80%	51,60%
	H=20m	30,18%	39,93%	47,60%

Matrice M2		Déc.	Mars	Juin
Niveaux de H	H=5m	12,85%	17,63%	20,43%
	H=10m	6,88%	8,93%	13,13%
	H=15m	7,70%	10,23%	14,18%
	H=20m	4,08%	6,05%	10,60%

Niveaux de D		D=15%	D=20%	D=30%	D=50%
Niveaux de D	D=15%	62,43%	72,70%	76,63%	
	D=20%	50,50%	59,85%	65,33%	
	D=30%	34,50%	43,45%	49,58%	
	D=50%	14,65%	19,78%	24,73%	

Niveaux de D		D=50%	D=60%	D=70%	D=80%
Niveaux de D	D=50%	16,48%	23,15%	29,40%	
	D=60%	8,78%	11,45%	15,90%	
	D=70%	4,30%	5,50%	8,60%	
	D=80%	1,95%	2,73%	4,43%	

Niveaux de I		i=0°	i=10°	i=20°	i=25°
Niveaux de I	i=0°	37,70%	43,58%	47,95%	
	i=10°	40,28%	46,90%	52,35%	
	i=20°	41,53%	50,95%	56,48%	
	i=25°	42,58%	54,35%	59,48%	

Niveaux de I		i=0°	i=10°	i=20°	i=25°
Niveaux de I	i=0°	7,78%	9,95%	12,08%	
	i=10°	8,25%	11,28%	14,45%	
	i=20°	8,00%	11,03%	15,60%	
	i=25°	7,48%	10,58%	16,20%	

Niveaux de N		N=1F	N= 2F	N=3F	N= 4F
Niveaux de N	N=1F	37,13%	44,50%	50,60%	
	N= 2F	39,45%	49,20%	54,38%	
	N=3F	42,90%	57,43%	54,05%	
	N= 4F	42,60%	52,30%	57,23%	

Niveaux de N		N=1F	N= 2F	N=3F	N= 4F
Niveaux de N	N=1F	7,45%	9,43%	12,48%	
	N= 2F	6,73%	10,08%	14,53%	
	N=3F	9,20%	12,70%	15,60%	
	N= 4F	8,13%	11,43%	15,73%	

ANNEXE4 : Calcul des effets moyens des facteurs morphologiques du modèle plot sur les contributions des toits à l'albédo effectif

M1		Déc.	Mars	Juin
Niveaux de H	H=5m	28,55%	28,30%	28,25%
	H=10m	31,45%	31,40%	31,43%
	H=15m	28,13%	28,53%	28,80%
	H=20m	27,45%	28,05%	28,40%

M2		Déc.	Mars	Juin
Niveaux de H	H=5m	67,68%	68,00%	68,15%
	H=10m	69,30%	70,40%	71,20%
	H=15m	60,23%	60,93%	62,00%
	H=20m	61,45%	62,63%	64,10%

Niveaux de D		D1=15%	D2=20%	D3=30%	D4=50%
Niveaux de D	D1=15%	9,48%	9,35%	9,33%	
	D2=20%	18,78%	18,70%	18,63%	
	D3=30%	31,93%	32,08%	32,10%	
	D4=50%	55,40%	56,15%	56,83%	

Niveaux de D		D1=50%	D2=60%	D3=70%	D4=80%
Niveaux de D	D1=50%	45,03%	45,50%	45,78%	
	D2=60%	60,85%	61,85%	62,73%	
	D3=70%	71,80%	72,85%	74,05%	
	D4=80%	80,98%	81,75%	82,90%	

ANNEXE5 : Calcul des effets moyens des facteurs morphologiques du modèle plot sur les contributions des façades à l'albédo effectif

M1		Déc.	Mars	Juin
Niveaux de H	H=05m	17,03%	10,95%	8,75%
	H=10m	29,13%	19,23%	14,45%
	H=15m	33,78%	25,68%	19,63%
	H=20m	42,38%	32,00%	23,98%

M2		Déc.	Mars	Juin
Niveaux de H	H=05m	19,53%	14,35%	11,43%
	H=10m	23,80%	20,65%	15,68%
	H=15m	32,10%	28,83%	23,80%
	H=20m	34,48%	31,35%	25,28%

Niveaux de D		D1=15%	D2=20%	D3=30%	D4=50%
Niveaux de D	D1=15%	28,08%	17,93%	14,05%	
	D2=20%	30,73%	21,45%	16,08%	
	D3=30%	33,58%	24,45%	18,28%	
	D4=50%	29,93%	24,03%	18,40%	

Niveaux de D		D1=50%	D2=60%	D3=70%	D4=80%
Niveaux de D	D1=50%	38,50%	31,33%	24,80%	
	D2=60%	30,40%	26,70%	21,38%	
	D3=70%	23,93%	21,65%	17,35%	
	D4=80%	17,08%	15,50%	12,65%	

ANNEXE6 : Matrice d'expériences L₂₇ 3¹³ (13 facteurs à trois niveaux, 27 essais), source : <http://plan-experiences-alexis.com/WordPress/matrices-factorielles-fractionnaires-orthogonales-plan-experience-efficace-alexis-philippe/>

N° essai	Facteurs contr TM 's												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

**ANNEXE7 : Calcul des effets moyens des niveaux de réflectivité des surfaces urbaines
du modèle plot sur l'albédo effectif**

Réflectivité des façades		Déc.	Mars	Juin
Façade Nord	R=0.10	22,36%	20,75%	20,15%
	R=0.45	23,56%	22,37%	21,25%
	R=0.80	24,56%	23,24%	22,06%

Réflectivité des sols		Déc.	Mars	Juin
Sol Nord	R=0.05	23,00%	21,71%	19,95%
	R=0.25	22,82%	21,17%	20,78%
	R=0.45	24,66%	23,48%	22,72%

Façade Sud	R=0.10	17,78%	17,44%	19,11%
	R=0.45	23,81%	22,96%	21,53%
	R=0.80	28,89%	25,97%	22,81%

Sol Sud	R=0.05	23,07%	21,49%	19,72%
	R=0.25	22,91%	20,93%	20,75%
	R=0.45	24,50%	23,94%	22,98%

Façade Est	R=0.10	21,37%	19,10%	18,71%
	R=0.45	24,19%	23,13%	21,80%
	R=0.80	24,93%	24,13%	22,95%

Sol Est	R=0.05	22,19%	21,44%	20,18%
	R=0.25	22,98%	20,87%	20,66%
	R=0.45	25,31%	24,05%	22,62%

Façade Ouest	R=0.10	21,55%	19,51%	18,71%
	R=0.45	23,89%	22,74%	21,71%
	R=0.80	25,05%	24,11%	22,95%

Sol Ouest	R=0.05	22,56%	21,47%	20,02%
	R=0.25	23,25%	21,17%	20,73%
	R=0.45	24,68%	23,72%	22,70%

**ANNEXE8 : Calcul des contributions des façades N, S, E et O du modèle plot à
l'absorption de la totalité des façades**

	fac N			fac S			fac E			fac O		
	21-mars	21-juin	21-déc	21-mars	21-juin	21-déc	21-mars	21-juin	21-déc	21-mars	21-juin	21-déc
1	3,2%	10,4%	2,7%	47,4%	22,0%	66,0%	24,6%	33,8%	15,5%	24,8%	33,8%	15,8%
2	2,2%	9,6%	2,9%	53,1%	25,5%	61,4%	22,1%	32,2%	17,6%	22,5%	32,6%	18,1%
3	2,2%	8,8%	3,3%	52,3%	34,2%	54,3%	22,5%	28,2%	20,5%	23,0%	28,8%	21,8%
4	2,5%	11,4%	3,2%	54,1%	25,6%	62,0%	21,5%	31,4%	17,2%	21,8%	31,6%	17,6%
5	2,2%	10,1%	3,6%	53,7%	35,2%	55,2%	21,8%	27,0%	19,9%	22,3%	27,7%	21,4%
6	3,7%	12,9%	3,2%	47,4%	19,6%	66,5%	23,7%	32,8%	14,7%	25,2%	34,7%	15,7%
7	2,3%	12,9%	4,3%	59,8%	39,5%	60,5%	18,6%	23,4%	16,7%	19,3%	24,1%	18,6%
8	4,9%	16,8%	4,1%	47,5%	18,4%	66,8%	23,0%	31,3%	14,0%	24,7%	33,5%	15,1%
9	2,8%	16,2%	3,8%	59,0%	24,0%	66,3%	18,6%	29,3%	14,5%	19,5%	30,5%	15,4%
10	1,4%	9,1%	2,5%	62,4%	37,2%	63,7%	19,7%	29,5%	18,6%	16,4%	24,2%	15,2%
11	1,6%	8,9%	2,0%	57,9%	31,0%	73,4%	22,7%	33,9%	13,6%	17,8%	26,1%	11,0%
12	1,8%	8,5%	1,9%	59,7%	31,5%	73,6%	22,3%	35,3%	14,2%	16,1%	24,7%	10,4%
13	1,3%	9,0%	1,6%	50,9%	24,2%	67,8%	18,2%	25,2%	11,4%	29,7%	41,6%	19,2%
14	1,1%	8,0%	1,2%	49,8%	21,4%	66,3%	18,8%	27,1%	12,5%	30,4%	43,5%	20,0%
15	-0,1%	7,8%	1,0%	55,5%	30,1%	56,3%	18,0%	25,1%	17,2%	26,7%	37,0%	25,5%
16	0,9%	8,7%	0,6%	41,8%	15,7%	59,3%	31,9%	42,4%	22,3%	25,4%	33,2%	17,8%
17	-2,1%	6,3%	-0,8%	49,2%	23,3%	49,1%	28,2%	37,7%	27,8%	24,6%	32,7%	23,9%
18	0,7%	8,0%	0,8%	43,1%	18,2%	61,0%	30,8%	40,5%	20,7%	25,5%	33,3%	17,4%
19	0,3%	6,2%	1,2%	60,9%	36,7%	68,5%	17,1%	24,8%	13,1%	21,7%	32,3%	17,2%
20	0,7%	6,5%	1,2%	63,0%	33,8%	69,7%	15,2%	25,1%	12,2%	21,1%	34,6%	17,0%
21	0,2%	4,1%	0,9%	59,1%	31,7%	75,0%	17,8%	28,1%	10,5%	22,9%	36,2%	13,6%
22	-2,0%	4,7%	-1,1%	55,2%	24,5%	62,9%	28,4%	43,3%	22,9%	18,4%	27,6%	15,3%
23	-0,1%	5,1%	0,2%	51,7%	24,3%	69,6%	30,6%	44,9%	19,0%	17,8%	25,6%	11,2%
24	-1,9%	4,4%	-1,3%	54,6%	29,4%	62,9%	27,6%	38,9%	22,7%	19,6%	27,3%	15,7%
25	-1,2%	5,0%	-1,0%	41,4%	14,7%	61,8%	26,4%	35,6%	17,3%	33,4%	44,7%	21,9%
26	-4,4%	4,0%	-4,3%	48,6%	23,6%	56,7%	25,0%	32,4%	21,1%	30,7%	39,9%	26,5%
27	-4,8%	1,4%	-4,7%	47,5%	17,0%	55,9%	25,7%	36,9%	21,6%	31,6%	44,7%	27,1%
effet global	0,7%	8,3%	1,2%	52,8%	26,4%	63,4%	23,0%	32,5%	17,4%	23,4%	32,8%	18,0%

ANNEXE9 : Effets de l'inclinaison des façades sud du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif le 21/12 (H=15m)

H=15m	Angle d'inclinaison de la façade sud			
Densité	0°	10°	20°	30°
15%	29,84%	30,32%	30,74%	—
20%	30,66%	31,06%	31,42%	31,86%
30%	32,22%	32,53%	32,72%	33,08%
40%	33,80%	33,97%	34,08%	34,30%
50%	35,48%	35,47%	35,48%	35,54%
60%	37,23%	37,06%	36,89%	36,84%
70%	39,14%	38,67%	38,42%	38,17%
80%	40,94%	40,41%	39,94%	39,57%
90%	42,83%	42,20%	41,54%	41,01%

ANNEXE10 : Effets de l'inclinaison des façades nord du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif le 21/12 (H=15m)

H=15m	Angle d'inclinaison de la façade nord		
Densité	0°	10°	20°
15%	29,84%	29,22%	28,55%
20%	30,66%	30,09%	29,27%
30%	32,22%	31,65%	30,83%
40%	33,80%	33,11%	32,45%
50%	35,48%	34,73%	34,05%
60%	37,23%	36,48%	35,72%
70%	39,14%	38,21%	37,39%
80%	40,94%	40,04%	39,17%
90%	42,83%	41,96%	41,03%

ANNEXE11 : Effets de l'inclinaison des façades nord et sud du canyon EO sur la variation de l'albédo effectif le 21/12 (H=15m)

H=15m	Angle d'inclinaison des deux façades nord et sud			
Densité	0°	10°	20°	30°
15%	29,84%	29,75%	—	—
20%	30,66%	30,44%	—	—
30%	32,22%	31,87%	31,62%	—
40%	33,80%	33,35%	32,97%	32,65%
50%	35,48%	34,85%	34,29%	33,88%
60%	37,23%	36,39%	35,66%	35,13%
70%	39,14%	37,97%	37,09%	36,37%
80%	40,94%	39,61%	38,58%	37,69%
90%	42,83%	41,40%	40,11%	39,04%

ANNEXE12 : Effets de l'inclinaison des façades est du canyon NS sur la variation de l'albédo effectif le 21/12 (H=15m)

Densité	0°	1F_10°	1F_20°
15%	30,25%	30,14%	30,03%
20%	30,77%	30,64%	30,51%
30%	31,91%	31,72%	31,53%
40%	33,20%	32,92%	32,66%
50%	34,65%	34,29%	33,94%
60%	36,24%	35,75%	35,33%
70%	38,06%	37,48%	36,92%
80%	40,09%	39,32%	38,64%
90%	42,37%	41,43%	40,52%

ANNEXE13 : Effets de l'inclinaison des façades est et ouest du canyon NS sur la variation de l'albédo effectif le 21/12 (H=15m)

Densité	0°	2F_10°	2F_20°
15%	30,25%	30,07%	—
20%	30,77%	30,55%	—
30%	31,91%	31,57%	31,30%
40%	33,20%	32,71%	32,31%
50%	34,65%	33,90%	33,46%
60%	36,24%	35,39%	34,72%
70%	38,06%	36,96%	36,10%
80%	40,09%	38,70%	37,62%
90%	42,37%	40,64%	39,29%

ANNEXE14 : Calcul des effets moyens des niveaux de réflectivité des surfaces urbaines du canyon EO sur l'albédo effectif.

Réflectivité des façades		Déc.	Mars	Juin
Façade	R=0.10	25,32%	23,66%	21,70%
	R=0.45	26,26%	24,06%	21,92%
	R=0.80	28,25%	25,84%	23,18%

Réflectivité des sols		Déc.	Mars	Juin
Sol Nord	R=0.05	26,47%	24,13%	20,50%
	R=0.25	26,92%	24,97%	22,22%
	R=0.45	26,44%	24,45%	24,07%

Réflectivité des façades		Déc.	Mars	Juin
Façade	R=0.10	17,19%	18,00%	19,73%
	R=0.45	26,39%	24,42%	22,29%
	R=0.80	36,25%	31,13%	24,77%

Réflectivité des sols		Déc.	Mars	Juin
Sol Sud	R=0.05	26,70%	23,24%	19,99%
	R=0.25	26,01%	23,76%	22,01%
	R=0.45	27,11%	26,55%	24,80%

ANNEXE15 : Calcul des contributions des surfaces urbaines du canyon EO à l'absorption urbaine.

ESSAIS	sol nord			sol sud			Façades nord			Façades sud		
	21-mars	21-juin	21-déc.	21-mars	21-juin	21-déc.	21-mars	21-juin	21-déc.	21-mars	21-juin	21-déc.
1	24,44%	38,11%	5,53%	43,00%	41,76%	29,05%	1,25%	2,81%	1,99%	19,97%	6,00%	52,05%
2	1,97%	21,20%	2,39%	21,79%	29,65%	2,87%	1,81%	4,72%	2,86%	41,81%	12,12%	59,17%
3	0,22%	1,73%	0,26%	0,25%	3,01%	0,27%	1,10%	3,84%	1,67%	24,07%	17,36%	23,18%
4	24,16%	37,60%	5,38%	42,69%	41,19%	28,43%	1,36%	3,12%	2,21%	18,63%	5,15%	50,51%
5	1,77%	20,85%	2,10%	21,73%	29,17%	2,50%	1,74%	4,89%	2,90%	38,78%	10,41%	55,62%
6	0,21%	1,71%	0,26%	0,25%	2,99%	0,27%	0,95%	3,79%	1,57%	21,60%	16,03%	20,22%
7	24,22%	37,42%	4,92%	42,09%	40,50%	25,87%	1,53%	3,57%	2,64%	16,05%	3,17%	49,23%
8	1,19%	20,62%	1,15%	21,25%	28,70%	1,24%	1,64%	5,14%	2,96%	34,82%	7,49%	51,48%
9	0,19%	1,67%	0,24%	0,24%	2,95%	0,27%	0,79%	3,73%	1,46%	18,86%	14,54%	16,93%
10	12,05%	27,06%	3,16%	27,54%	27,07%	6,80%	0,77%	2,16%	1,40%	23,49%	6,99%	54,86%
11	0,30%	2,52%	0,36%	0,35%	6,93%	0,37%	0,69%	2,61%	1,17%	23,90%	12,83%	23,56%
12	2,33%	27,51%	2,72%	22,91%	36,53%	2,90%	1,57%	5,09%	2,85%	61,20%	18,37%	79,89%
13	9,83%	22,60%	2,31%	35,12%	34,28%	9,84%	0,53%	1,89%	0,77%	19,13%	5,52%	50,05%
14	0,23%	2,42%	0,31%	0,39%	7,53%	0,43%	-0,15%	2,29%	0,42%	21,37%	11,40%	20,50%
15	1,66%	24,81%	1,90%	28,99%	42,97%	4,27%	0,52%	4,74%	1,32%	55,92%	15,03%	78,73%
16	14,41%	29,47%	4,51%	32,18%	29,53%	7,65%	0,31%	2,17%	0,09%	15,40%	3,69%	45,15%
17	0,33%	2,71%	0,40%	0,34%	7,42%	0,39%	-1,18%	1,78%	-0,51%	18,27%	9,68%	16,80%
18	3,18%	30,57%	4,23%	30,24%	40,34%	3,42%	-1,22%	4,79%	-0,68%	52,59%	11,53%	76,14%
19	0,43%	5,23%	0,53%	0,69%	10,60%	0,71%	0,23%	1,22%	0,56%	23,60%	6,82%	22,98%
20	4,22%	29,96%	2,82%	40,84%	41,96%	4,27%	0,54%	1,74%	1,32%	42,16%	13,20%	79,74%
21	1,14%	14,16%	1,42%	1,86%	29,05%	1,92%	0,66%	3,40%	1,55%	62,98%	18,68%	61,53%
22	0,56%	6,13%	0,69%	0,36%	10,00%	0,52%	-1,02%	0,83%	-0,62%	21,13%	5,46%	19,95%
23	6,51%	38,02%	4,76%	40,79%	36,81%	2,15%	-1,08%	2,28%	-1,01%	39,57%	9,77%	79,78%
24	1,64%	17,17%	2,05%	1,06%	28,29%	1,56%	-2,77%	2,48%	-1,62%	61,69%	15,50%	58,92%
25	0,28%	5,68%	0,42%	0,79%	11,51%	0,84%	-2,48%	0,64%	-2,11%	18,06%	4,34%	16,26%
26	5,04%	32,79%	3,45%	51,11%	44,96%	6,78%	-1,74%	1,79%	-4,66%	31,74%	7,74%	77,02%
27	0,96%	15,98%	1,46%	2,58%	32,74%	2,84%	-7,60%	1,99%	-6,58%	58,94%	12,47%	54,89%
effet global	5,31%	19,10%	2,21%	18,94%	25,87%	5,50%	-0,05%	2,94%	0,52%	32,80%	10,42%	47,97%

ANNEXE16 : Calcul des effets moyens des niveaux de réflectivité des surfaces urbaines du canyon EO sur les contributions à l'absorption urbaine

FAC N	0,1	2,25%	1,35%	3,96%
	0,45	0,76%	0,20%	3,06%
	0,8	-1,46%	-1,70%	1,82%
FAC S	0,1	50,77%	35,91%	12,49%
	0,45	48,25%	33,09%	10,47%
	0,8	44,88%	29,41%	8,29%
sol N	0,05	2,76%	5,92%	20,57%
	0,25	2,14%	5,23%	19,08%
	0,45	1,73%	4,79%	17,65%
sol S	0,05	6,35%	20,45%	27,60%
	0,25	5,51%	18,98%	25,81%
	0,45	4,63%	17,40%	24,20%

ANNEXE17 : Calcul des effets moyens des niveaux de réflectivité des surfaces urbaines du canyon NS sur l'absorption urbaine.

	Niveaux	déc	mars	juin
ref fac E	0,1	78,58%	78,61%	78,63%
	0,45	76,31%	76,58%	76,83%
	0,8	72,75%	73,22%	73,69%
ref fac O	0,1	79,44%	79,46%	79,49%
	0,45	75,94%	76,21%	76,45%
	0,8	72,26%	72,74%	73,21%
ref sol E	0,05	77,31%	77,70%	78,04%
	0,25	75,70%	75,94%	76,21%
	0,45	74,63%	74,78%	74,90%
ref sol O	0,05	76,96%	77,34%	77,70%
	0,25	76,26%	76,51%	76,74%
	0,45	74,42%	74,57%	74,71%

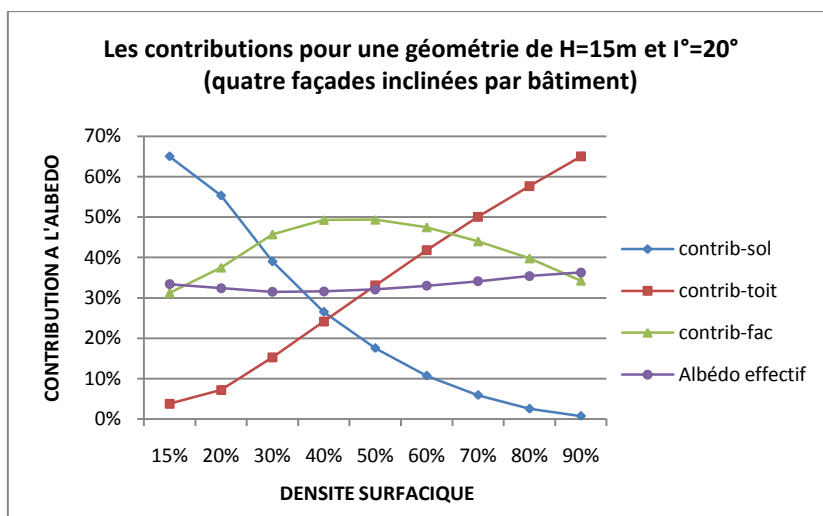
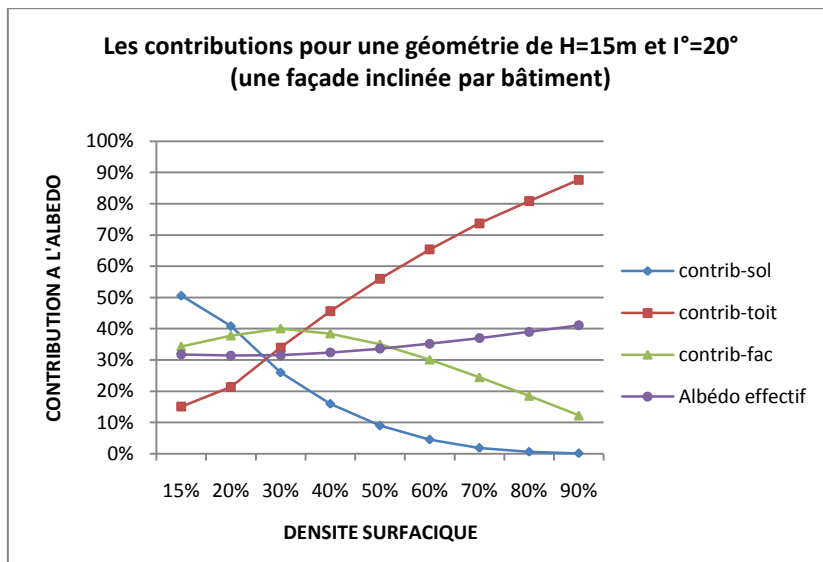
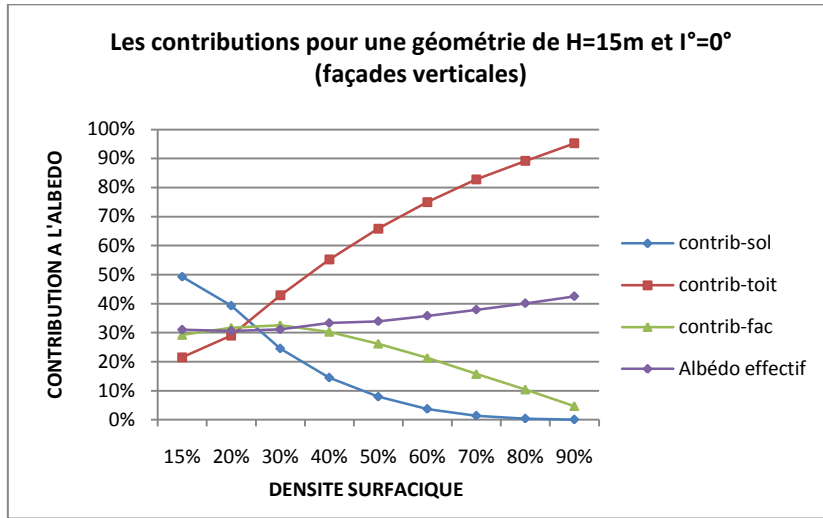
**ANNEXE18 : Calcul des effets moyens des niveaux de réflectivité des surfaces urbaines
du canyon NS sur leurs contributions à l'absorption urbaine**

ESSAIS	sol est			sol ouest			Façades est			Façades ouest		
	21-mars	21-juin	21-déc.	21-mars	21-juin	21-déc.	21- mars	21-juin	21-déc.	21- mars	21-juin	21-déc.
1	34,06%	35,40%	32,46%	33,91%	35,25%	32,29%	10,30%	9,01%	11,97%	10,42%	9,04%	12,01%
2	16,28%	17,89%	14,93%	16,64%	17,84%	14,54%	17,31%	15,91%	18,73%	17,53%	16,05%	19,63%
3	1,90%	2,14%	2,57%	1,89%	2,28%	2,57%	10,87%	10,66%	10,25%	11,48%	10,98%	10,73%
4	33,33%	34,68%	31,70%	32,93%	34,32%	31,27%	11,58%	10,12%	13,44%	9,35%	8,05%	10,83%
5	15,87%	17,46%	14,54%	16,13%	17,32%	14,06%	18,29%	16,79%	19,81%	15,35%	14,00%	17,28%
6	1,88%	2,12%	2,55%	1,88%	2,26%	2,56%	10,97%	10,75%	10,34%	10,15%	9,71%	9,36%
7	32,76%	34,15%	31,09%	31,46%	32,97%	29,67%	13,45%	11,75%	15,62%	7,30%	6,08%	8,67%
8	15,43%	17,02%	14,08%	15,37%	16,57%	13,28%	19,63%	18,00%	21,29%	12,29%	11,06%	14,09%
9	1,86%	2,10%	2,53%	1,86%	2,23%	2,54%	11,07%	10,84%	10,44%	8,67%	8,29%	7,84%
10	22,86%	23,97%	21,14%	19,71%	20,74%	18,54%	9,35%	8,31%	10,63%	11,73%	10,51%	13,49%
11	2,68%	2,92%	2,69%	2,80%	2,81%	2,59%	8,73%	8,59%	8,52%	10,45%	10,29%	10,80%
12	20,67%	22,87%	19,24%	19,25%	21,03%	16,97%	21,47%	19,61%	22,83%	26,22%	24,03%	28,62%
13	19,39%	20,30%	17,94%	25,83%	27,05%	24,46%	9,01%	7,95%	10,32%	9,49%	8,45%	10,99%
14	2,60%	2,83%	2,62%	3,08%	3,09%	2,85%	8,49%	8,34%	8,27%	8,78%	8,68%	9,07%
15	19,22%	21,24%	17,97%	23,97%	25,99%	21,37%	21,65%	19,64%	23,19%	22,23%	20,22%	24,49%
16	25,84%	26,86%	24,20%	22,11%	23,14%	20,97%	9,22%	8,17%	10,54%	6,86%	6,04%	8,08%
17	2,91%	3,16%	2,92%	3,01%	3,01%	2,79%	8,21%	8,06%	7,97%	6,87%	6,84%	7,09%
18	24,45%	26,65%	23,09%	22,34%	24,15%	19,92%	22,27%	20,13%	23,94%	17,51%	15,77%	19,49%
19	4,40%	4,70%	3,81%	4,60%	5,19%	4,56%	5,47%	5,19%	5,65%	8,47%	7,96%	8,86%
20	24,10%	25,82%	22,19%	28,13%	30,02%	26,27%	12,62%	11,23%	14,15%	21,64%	19,41%	23,92%
21	11,99%	12,88%	10,79%	13,13%	14,42%	12,51%	15,32%	14,51%	15,98%	23,62%	22,24%	24,86%
22	5,26%	5,60%	4,58%	4,22%	4,79%	4,19%	5,13%	4,86%	5,27%	6,71%	6,27%	7,01%
23	31,86%	33,69%	29,76%	24,42%	26,00%	22,86%	13,18%	11,80%	14,74%	16,88%	14,92%	18,90%
24	14,90%	15,90%	13,52%	12,52%	13,76%	11,98%	15,00%	14,17%	15,67%	19,46%	18,22%	20,59%
25	4,88%	5,20%	4,23%	5,14%	5,77%	5,11%	4,62%	4,39%	4,76%	4,85%	4,54%	5,08%
26	28,34%	29,88%	26,55%	32,23%	33,87%	30,59%	12,40%	11,00%	14,00%	13,14%	11,55%	14,78%
27	14,41%	15,33%	13,07%	15,87%	17,22%	15,30%	14,24%	13,40%	14,92%	14,85%	13,85%	15,75%
Effet global	16,08%	17,14%	15,06%	16,09%	17,15%	15,06%	12,59%	11,60%	13,45%	13,05%	11,96%	14,16%

**ANNEXE19 : Calcul des effets moyens des niveaux de réflectivité des surfaces du
canyon NS sur leurs contributions à l'absorption**

	Niveaux	décembre	mars	juin
FAC E	0,1	14,65%	13,72%	12,65%
	0,45	14,02%	13,15%	12,09%
	0,8	11,68%	10,89%	10,06%
FAC O	0,1	16,99%	15,73%	14,50%
	0,45	14,28%	13,16%	12,06%
	0,8	11,21%	10,26%	9,33%
sol E	0,05	16,45%	17,49%	18,59%
	0,25	15,08%	16,10%	17,16%
	0,45	13,67%	14,64%	15,67%
sol O	0,05	16,56%	17,62%	18,71%
	0,25	14,99%	16,03%	17,09%
	0,45	13,63%	14,62%	15,66%

ANNEXE20 : Tendances de variation des contributions des surfaces urbaines du modèle
 Plot à l'albédo effectif, le 21/12, en fonction de la densité surfacique (%)



ANNEXE 21 : SCRIPT POUR LE CALCUL DE L'ALBEDO EFFECTIF GEOMETRIE D'LBEDO HOMOGENE DE 0.45

```

cd %1
set debut=%time%
echo %debut% >>result.txt

echo _____PREPARATION_geom_____numerotation_triangulation_surface_coef_reflexion_fichier_meteo_____>>result.txt
sequence_noface masque_Extraction 1 geometrie >>result.txt
triangle_face geometrie geom 3 >>result.txt
surf_cont geom surface >>result.txt
echo _____attribuer_coef_reflexion_geom_____>>result.txt
val_op_val surface - surface val_nulle >>result.txt
val_op_val val_nulle + 0.45 coef_reflexion >>result.txt
@echo off >>fich_meteo.txt
echo _____ETAPE DE CALCUL DES FACTEURS MASQUE_____VUE DE CIEL_____FFORME_____>>result.txt
echo _____CREATION_CIEL_____>>result.txt
geode_ciel ciel 4 1 >>result.txt
angl_solid ciel anglesolide >>result.txt
echo _____CALCUL_FACTEUR_VUE_DE_CIEL_____>>result.txt
IF EXIST facteurciel.val goto facteurforme
fraction_ciel geom masque ciel anglesolide 89 0 facteurciel >>result.txt
analyse_cir_val geom facteurciel 0 10000 0 10000 graph_facteurciel >>result_facteur_ciel.txt
:facteurforme
Echo_____>>result.txt
echo _____CALCUL_FACTEURS_DE_FORME_____>>result.txt
IF EXIST facteurforme.fac goto masque
facform geom masque 0 facteurforme ff_scene ff_hors_scene >>result.txt
:masque
echo_____>>result.txt
echo _____MASQUE_AU_SOLEIL_____>>result.txt
masques_sol geom masque fmasque 89 45 5 21/12 21/3 21/6 >>result.txt
echo. >>result.txt
echo _____SIMULATION ALBEDO EFFECTIF_ORIENTATION_____>>result.txt
echo _____DECEMBRE_____>>result.txt
echo _____GLOBAL_INCIDENT_____>>result.txt
echo_____>>result.txt
energie_solaire_directe_meteo geom fmasque 21/12 8:0 16:0 1:0 fich_meteo 45 Incident_direct_21_12 >>result.txt
energie_solaire_diffuse_meteo geom masque ciel anglesolide ..\..\radiance\RadianceSolaire_21_12 8:0 16:0 1:0 89 fich_meteo
incident_diffus_21_12 >>result.txt
val_op_val_temps incident_direct_21_12 + incident_diffus_21_12 8:0 16:0 1:0 global_incident_21_12 >>result.txt

```

```

analyse_val_tps global_incident_21_12 8:0 16:0 >>result.txt
echo _____valeurs diurnes_____>>result.txt
cumul_val_face geometrie geom surface global_incident_21_12_val_cumul 2 INCIDENT_21_12_face >>result.txt
echo _____valeurs horaires_____>>result.txt
for %%X in (08H00, 09H00, 10H00, 11H00, 12H00, 13H00, 14H00, 15H00, 16H00) do cumul_val_face geometrie geom surface
global_incident_21_12_%%X 2 incident_21_12_%%X_face >>result.txt
echo _____REFLECHI_VERS_LE_CIEL_____>>result.txt
echo _____>>result.txt
for %%X in (08H00, 09H00, 10H00, 11H00, 12H00, 13H00, 14H00, 15H00, 16H00) do radiosite global_incident_21_12_%%X
coef_reflexion facteurforme surface incidentAR_21_12_%%X reflechiAR_21_12_%%X absorbeAR_21_12_%%X e 100
>>result_radiosite_21_12.txt
analyse_val_tps reflechiAR_21_12 8:0 16:0 >>result.txt
val_op_val facteurciel / 100 SVF >>result.txt
val_op_val reflechiAR_21_12_val_cumul x SVF reflechi_vers_ciel_21_12 >>result.txt
echo _____valeurs diurnes_____>>result.txt
cumul_val_face geometrie geom surface reflechi_vers_ciel_21_12 2 REFLECHI_CIEL_21_12_face >>result.txt
echo _____valeurs horaires_____>>result.txt
val_op_val_temps reflechiAR_21_12 x SVF 8:0 16:0 1:0 reflechi_ciel_21_12 0 >>result.txt
for %%X in (08H00, 09H00, 10H00, 11H00, 12H00, 13H00, 14H00, 15H00, 16H00) do cumul_val_face geometrie geom surface
reflechi_ciel_21_12_%%X 2 reflechi_ciel_21_12_%%X_face >>result.txt
echo _____DUREE_ENSOLEILLEMENT_DECEMBRE_____>>result.txt
duree_enseillement geom fmasque 21/12 8:0 16:0 0 ensoleillement_21_12 >>result.txt
cumul_val_face geometrie geom surface ensoleillement_21_12 4 ensoleillement_moyen_21_12_face >>result.txt

mkdir ANALYSE_21_12
copy REFLECHI_CIEL_21_12_face.val ANALYSE_21_12
copy INCIDENT_21_12_face.val ANALYSE_21_12
copy geom.cir ANALYSE_21_12
copy FACTEUR_CIEL_face.val ANALYSE_21_12
copy ensoleillement_moyen_21_12_face.val ANALYSE_21_12
for %%X in (08H00, 09H00, 10H00, 11H00, 12H00, 13H00, 14H00, 15H00, 16H00) do copy incident_21_12_%%X_face.val
ANALYSE_21_12
for %%X in (08H00, 09H00, 10H00, 11H00, 12H00, 13H00, 14H00, 15H00, 16H00) do copy reflechi_ciel_21_12_%%X_face.val
ANALYSE_21_12
set fin=%time%
echo la simulation a commence a %debut% >>result.txt
echo et elle a termine a %fin% >>result.txt
cd ..

```