



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse)

Cotutelle internationale avec l'Université Fédérale de Rio de Janeiro.

Présentée et soutenue par :
Tathiane AGRA DE LEMOS MARTINS

le 31 Mars 2014

Titre :

Des contraintes solaires à des opportunités de projet urbain: optimisation de
typo-morphologies urbaines en climat tropical

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie civil

Unité de recherche :

LMDC (INSA) et LRA (ENSA)

Directeur(s) de Thèse :

Luc ADOLPHE

Jury :

BASTOS, Leopoldo (Codirecteur)

BARBIRATO, Gianna (Rapporteur)

CASTRO, Eduardo (Rapporteur)

BONNEAUD, Frédéric (Examineur)

REGO, Andrea (Examineur)

FERNANDEZ, Pierre (invité)

Université de Toulouse III – Paul Sabatier
Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse
Ecole Doctorale MEGeP - Mécanique, Génie Civil et Procédés
Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions

Thèse de Doctorat
Spécialité : Génie Civil

Titre de la thèse :

**DES CONTRAINTES SOLAIRES À DES OPPORTUNITÉS DE DESSIN URBAIN :
Optimisation de typo-morphologies urbaines en climat tropical au Brésil**

Auteur :
Tathiane AGRA DE LEMOS MARTINS

Direction de Thèse :
Luc ADOLPHE
Leopoldo EURICO GONÇALVES BASTOS

Membres du Jury :
Gianna BARBIRATO (Rapporteur)
Eduardo CASTRO (Rapporteur)
Andrea REGO (Examineur)
Frédéric BONNEAUD (Examineur)
Pierre FERNANDEZ (Invité)

Rio de Janeiro
Mars, 2014.

RESUME

Environ trois quarts des ressources globales sont aujourd'hui consommés dans les aires urbaines. Le processus d'urbanisation induit des changements sévères du climat local, de la qualité environnementale des espaces, ainsi qu'une augmentation significative de la demande énergétique des bâtiments. Les projections statistiques sur la croissance de la population urbaine indiquent que cette situation tendra à s'aggraver dans les années à venir. Il devient donc impératif de chercher d'autres stratégies pour mieux adapter les environnements urbains aux nouvelles demandes énergétiques, afin de réduire l'empreinte environnementale des villes. Dans ce contexte, ce travail est une contribution à la recherche énergétique urbaine, plus particulièrement en ce qui concerne l'énergie consommée et potentiellement produite par les bâtiments à l'échelle urbaine locale. La morphologie urbaine est ici considérée comme un paramètre crucial dans le processus d'amélioration de l'efficacité énergétique du cadre bâti. Dans les zones de basses latitudes, sous climat tropical, l'énergie solaire incidente est extrêmement abondante. Toutefois, la bonne utilisation de cette ressource dans les bâtiments peut suggérer l'adoption de formes urbaines très peu denses et étales, en vue de réduire les obstructions produites par l'environnement proche. A rebours, ces formes urbaines très peu denses peuvent entraîner une augmentation des apports solaires sur les façades, élevant la demande énergétique. Le contrôle des gains solaires sur les façades pour la réduction de la demande énergétique peut ainsi représenter une perte potentielle en terme d'éclairage naturel des espaces, et une réduction du potentiel de production d'énergie solaire. Afin de quantifier le potentiel de ces stratégies conflictuelles, il devient indispensable de convoquer des modèles d'analyse pluridisciplinaires, permettant de mettre en œuvre des approches multicritères dans le processus de conception de la forme urbaine. Cette thèse s'appuie sur une réflexion prospective sur les quartiers de la ville de Maceió, Alagoas, au Brésil. Dans un premier temps, un ensemble de paramètres morphologiques caractéristiques sont employés pour identifier et caractériser le potentiel solaire de typologies de référence de la ville. Ensuite, ces paramètres sont soumis à une analyse de sensibilité via un plan d'expérience. Les paramètres statistiquement significatifs sont alors intégrés à une méthode paramétrique d'optimisation dans laquelle l'algorithme génétique NSGA-II est couplé à un algorithme simplifiée de radiosité, visant à maximiser le potentiel de production d'énergie sur les toitures des bâtiments, tout en minimisant les apports solaires sur ses façades. Nous considérons des seuils d'éclairage naturel et intégrons des règles locales d'urbanisme comme contraintes aux projets. Cinq typologies représentatives du tissu urbain de Maceió ont ainsi été identifiées. L'ensemble des indicateurs les plus influents sur le potentiel solaire des formes urbaines a été hiérarchisé, en mettant l'accent notamment sur le rôle du prospect moyen ou de l'albédo des surfaces. La méthode d'optimisation a permis de tester plus de 80.000 configurations d'ilots urbains et les résultats obtenus font apparaître une grande diversité de morphologies «optimum». Ces projets ont des performances solaires supérieures à celles des typologies existantes dans la ville. Cette intégration de stratégies énergétiques contradictoires montre qu'au-delà de l'intégration de contraintes variées et d'une meilleure adaptation à la complexité du processus de design urbain, l'approche utilisée ici apparaît très utile pour la recherche de solutions urbaines performantes à l'échelle des quartiers. Cette approche peut ainsi participer au renouvellement de l'Architecture de la Ville.

Mots-clés: morphologie urbaine; potentiel solaire; énergétique urbaine; analyse de sensibilité; optimisation; algorithme génétique; climat tropical.

Rio de Janeiro,
Mars 2014.

ABSTRACT

At the beginning of 21th century, the world was faced with unprecedented environmental transformations. The urbanization process reached record levels and it keeps increasing, especially in developing countries. Around 3/4 of global resources are currently consumed in urban settlements, with corresponding adverse environmental consequences which leads to severe local climate changes, affecting environmental quality of spaces and leading to a significant increase of energy demand in buildings. A projection of the world urban population indicates that this situation will worsen in the coming years. It is therefore imperative that we understand how to design less resource intensive urban settlements. This research consists of a contribution to the energy debate in cities, focusing on the energy potentially consumed and produced by the built environment in the neighborhood scale. Urban morphology has been pointed out as a pivotal issue on shifting to climate adapted urban environments towards energy efficiency of buildings. In tropical climate regions, solar energy represents a high potential for renewable electric production in buildings, recording high levels of irradiation throughout the year. Though, engaging such a strategy may suggest applying sparsely low-density urban forms, aiming at reducing obstructions caused by the urban built surroundings. On one hand, scattered and less dense urban forms may result in significant increase of solar thermal load in buildings vertical facades, but on the other hand, the control of the solar heat gains in urban facades may represent significant losses on indoors daylight levels and also reducing solar energy harness. Estimating the relative potential of these conflicting design strategies, taking into account the constrained parameters related to local building regulation, requires coupling multidisciplinary and multiobjective models of analysis in order to integrate multi-criteria approach in the urban design process. This thesis aims to contribute to a prospective energy debate toward sustainable urban districts for the city of Maceió in Brazil. Firstly, a set of energy-related morphological parameters are applied to identify, classify and characterize the solar potential of local urban typologies. Then, these parameters are analyzed by means of a sensitivity analysis using a design of experiments reduced factorial method. The statistically most significant parameters are then submitted to a parametric design methodology via optimization, in which the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) is coupled with a simplified radiosity algorithm. The solar constraints are integrated as design criteria aiming at maximizing the solar energy potential on building roofs and minimizing solar gains on the their vertical facades. Daylight threshold levels as well as local building regulation parameters are taken into account as design constraints. Five representative types of urban fabric of Maceió were identified which allowed examining and adapting them from the use of energy-related indicators of the urban form. A set of most influential indicators of solar potential of urban forms was hierarchized, highlighting the role of the aspect ratio and albedo of urban surfaces. The application of optimization algorithm allowed testing more than 80,000 urban settings, pointing out a great diversity of “optimum” morphologies of urban blocks. The urban block designs obtained behaved better compared to the existing local typologies. Dealing with conflicting energy strategies by means of a constrained evolutionary optimization design process offered a great opportunity in searching for new solutions to the urban design in the neighborhood scale, helping to guide urban designers’ decisions and allowing a renewal of the Architecture of the city.

Keywords: urban morphology; solar potential; energy in cities; sensitivity analysis; constrained optimization; genetic algorithms; Tropical climate.

Rio de Janeiro,
March 2014.

SOMMAIRE

RESUME	2
ABSTRACT	3
LISTE DE FIGURES	5
LISTE DE TABLEAUX	6
1. INTRODUCTION	7
1.1. JEUX D’HYPOTHESES.....	8
1.2. OBJECTIFS DU TRAVAIL.....	10
1.3. APPROCHE METHODOLOGIQUE.....	10
1.3.1. <i>Première étape</i>	10
1.3.2. <i>Deuxième étape</i>	11
1.3.3. <i>Troisième étape</i>	11
2. ANALYSE MORPHO-SOLAIRE	13
2.1. LE BILAN RADIATIF DES SURFACES URBAINES.....	14
2.2. APPLICATION POUR LA VILLE DE MACEIO.....	15
2.2.1. <i>Description des typologies urbaines de Maceió</i>	17
2.2.2. <i>Une analyse morpho-solaire des typo-morphologies urbaines existantes</i>	18
3. MIS EN ŒUVRE D’UN PLAN D’EXPERIENCE	24
3.1. METHODE DU FACTORIEL FRACTIONNE.....	24
3.2. TEST D’HYPOTHESE STATISTIQUE.....	25
3.3. DESCRIPTION DU MODELE URBAIN POUR LE PLAN D’EXPERIENCE (DOE).....	25
3.4. ANALYSE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES TYPO-MORPHOLOGIQUES.....	26
4. LA METHODOLOGIE D’OPTIMISATION	31
4.1. L’OPTIMISATION MULTI-OBJECTIVE ET L’ALGORITHME NSGA-II.....	31
4.2. LA METHODOLOGIE DE PROJET PAR OPTIMISATION.....	32
4.2.1. <i>La définition des variables de projet</i>	32
4.2.2. <i>Les contraintes du projet urbain</i>	32
4.2.3. <i>Les fonctions objectives</i>	33
4.3. VERS DES SOLUTIONS OPTIMALES.....	33
4.3.1. <i>Optimisation pour la classe typo-morphologique 4 : la ville verticale</i>	33
4.1.1. <i>Optimisation de la classe typo-morphologique 3: la ville compacte</i>	38
5. UNE ANALYSE PROSPECTIVE POUR LA VILLE DE MACEIO	45
5.1. CONTRIBUTION A L’APPROCHE INTERDISCIPLINAIRE DE L’ENERGIE URBAINE.....	45
5.1.1. <i>Implantation d’un micro réseau local de production et distribution d’énergie de source solaire</i>	45
5.1.2. <i>La proposition des ilots mixtes et multifonctionnels</i>	46
5.2. AIDE A LA DECISION URBAINE.....	48
5.2.1. <i>Proposition d’inclusion des nouveaux indicateurs de la forme urbaine dans le système</i>	48
5.3. DISPOSITIFS POUR L’AIDE A L’INTERVENTION URBAINE.....	49
5.3.1. <i>Proposition d’un code de micro-urbanisme</i>	49
6. CONCLUSIONS	58
7. REFERENCES	59
ANNEXE 1 – LISTE DE PUBLICATIONS	75

LISTE DE FIGURES

Figure 1: phénomènes radiatifs considérés dans le modèle d'analyse employé.....	11
Figure 2: approche méthodologique de la recherche.....	12
Figure 3: Moyenne mensuelle de l'irradiation solaire (directe et diffuse) pour Maceió (METEOTEST, 2011)...	16
Figure 4 : Moyenne mensuelle de température et humidité de l'air pour Maceió (METEOTEST, 2011).	16
Figure 5: Distribution spatiale des typologies urbaines de référence sur le tissu urbain de Maceió, Brésil.	17
Figure 6: processus de verticalisation et densification de la plaine maritime de Maceió. Source: image de l'auteur, 2013.....	18
Figure 7: modèle urbain simplifié utilisé dans l'étude statistique.....	26
Figure 8: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'irradiation solaire sur les toitures des bâtiments.	26
Figure 9: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'irradiation solaire sur la façade Ouest des bâtiments.	27
Figure 10: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'illuminance sur la façade Nord des bâtiments.	27
Figure 11: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'irradiation sur les toitures.....	29
Figure 12: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'irradiation sur les façades Nord.	30
Figure 13: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'illuminance sur les façades Nord.....	30
Figure 14: résumé des simulations pour la classe 4.....	34
Figure 15: violation des contraintes pour la classe 3.	34
Figure 16: résultats du premier processus d'optimisation.....	35
Figure 17: résultats de la deuxième optimisation.....	36
Figure 18 : projets du front de Pareto pour les deux scénarios d'optimisation multi objective pour la classe 4.	38
Figure 19: résumé des simulations pour la classe 3.....	39
Figure 20: violation des contraintes pour les simulations de la classe 3.....	39
Figure 21: résultats de l'optimisation multi objective restreinte par les paramètres du code local. Source: illustration de l'auteur.	40
Figure 22: vue de la typologie <i>C3(1)Max</i> générée par le processus d'optimisation, en démontrant la variation obtenue pour la hauteur moyenne. Source: illustration de l'auteur.	41
Figure 23: vue de la typologie <i>C3(1)</i> générée par le processus d'optimisation, en démontrant la variation obtenue pour la hauteur moyenne des bâtiments. Source: illustration de l'auteur.....	41
Figure 24: résultats de l'optimisation multi objective sans les contraintes du code local. Source: illustration de l'auteur.....	42
Figure 25: projets des fronts de Pareto pour les deux tours de simulations réalisés pour la classe 3.....	43
Figure 26: exemple de projet de voisinage a partir des îlots solaires proposés en associant les différents potentiels d'offre et demande.....	46
Figure 27: comparaison entre projets de plus fort et plus faible potentiel d'offre d'énergie solaire et de réduction des apports solaire.....	46
Figure 28: proposition d'intégration du mixité urbain d'usage et occupation du sol à des différentes formes d'îlot urbain obtenues.....	47
Figure 29: exemple d'intervention ponctuel dans le quartier de la plaine côtière de Maceió - plan. Source: illustration de l'auteur.	55
Figure 30: exemple d'intervention ponctuel dans le quartier de la plaine côtière de Maceió – perspective et spécifications des typologies d'îlot solaire. Source: illustration de l'auteur.....	55
Figure 31: exemple d'intervention ponctuel dans le quartier de la plaine côtière de Maceió - perspective. Source: illustration de l'auteur.	55
Figure 32: maquette d'un outil d'aide à la décision à partir de la méthode MSR à l'aide d'un algorithme de régression évolutionnaire. Source: adapté de modeFRONTIER, 2013.	57

LIST DE TABLEAUX

Tableau 1: les indicateurs morphologiques principaux considérés dans l'étude.	14
Tableau 2: paramètres spatiaux et performance climatique des cinq typologies urbaines de Maceió.	18
Tableau 3: synthèse des résultats des simulations et analyses portées pour la classe 1.	19
Tableau 4: synthèse des résultats des simulations et analyses portées pour la classe 2.	20
Tableau 5: synthèse des résultats des simulations et analyses portées pour la classe 3.	21
Tableau 6: synthèse des résultats des simulations et analyses portées pour la classe 4.	22
Tableau 7: synthèse des résultats des simulations et analyses portées pour la classe 5.	23
Tableau 8 : les intervalles des valeurs possibles (max et min) des facteurs principaux qui définissent les modèles urbains considérés.	25
Tableau 9: signification des résultats des tests statistiques concernant l'irradiation solaire sur les toitures des bâtiments.	28
Tableau 10: signification des résultats des tests statistiques concernant l'irradiation solaire sur les façades des bâtiments.	28
Tableau 11: signification des résultats des tests statistiques concernant le niveau d'illuminance sur la façade Nord des bâtiments.	28
Tableau 12: les valeurs limites de projet, les contraintes urbaines, le cas de base et les paramètres de projet optimaux.	37
Tableau 13: résumé des intervalles, contraintes et valeurs trouvées pour les configurations, original et optimisées, pour la classe 3.	44
Tableau 14: tableau de synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C4(1)6.	51
Tableau 15: tableau de synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C4(1)8.	52
Tableau 16: tableau de synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C4(2)9.	53
Tableau 17: tableau de synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C3(2).	54

1. INTRODUCTION

Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes (BUREAU, 2009). Dans le contexte brésilien, le processus d'urbanisation est galopant, en ayant pour conséquences deux effets collatéraux : une croissance encore plus rapide des villes plus peuplées sans un contrôle efficace en terme de politique de développement urbain et une explosion de la demande énergétique du cadre bâti. Dans la perspective de développement durable urbain, la morphologie construite joue un rôle crucial sur la demande énergétique globale des villes (OWENS, 1986) (DROEGE, 2007) (BATTY, 2008) (BREHENY, 1992) (FREY, 1999) (WILLIAMS, BURTON e JENKS, 2000). Par morphologie urbaine, nous nous référons ici à la forme et aux dimensions particulières et typiques des bâtiments. À cette échelle, les configurations des villes affectent directement les climats intérieurs et extérieurs des espaces habités et ont une répercussion directe sur la consommation de l'énergie grise et opérationnelle des bâtiments (RATTI, RAYDAN e STEEMERS, 2003).

Les bâtiments représentent une grande partie de la demande énergétique des villes. Au Brésil, ils correspondent à une fraction de 47 % (BRASIL, 2013). Bien que des nombreux efforts aient été récemment employés afin de favoriser l'efficacité énergétique des espaces construits, cela ne s'applique qu'aux bâtiments isolés (BRASIL., 2001). Cependant, quelques études ont récemment essayé de mesurer l'effet de la densité et des morphologies urbaines sur la consommation énergétique des bâtiments (MARTINS, BONHOMME e ADOLPHE, 2013) (BOYEUR, 2009), ainsi que sur leur potentiel de production d'énergie renouvelable, telle que l'énergie solaire (COMPAGNON, 2004) (MONTAVON, 2010) (KAMPF, MONTAVON, *et al.*, 2010) (HOFIERKA e KANUK) dans les pays développés. Pourtant, une approche intégrée de la morphologie urbaine et sa participation à la réduction de la demande énergétique des bâtiments et à la maximisation de la production locale d'énergie n'a pas été réellement mise en œuvre.

Dans les climats tropicaux, l'énergie solaire offre un énorme potentiel qui peut contribuer à différentes applications. En plus de l'éclairage naturel, l'énergie solaire peut être convertie pour la production locale d'énergie thermique et électrique. Toutefois, dans ces régions ensoleillées, les apports solaires sur l'enveloppe du bâtiment peuvent induire une surchauffe en produisant des conditions de confort thermique intérieur extrêmement hostiles, et qui peuvent par conséquent, augmenter la demande énergétique pour le refroidissement des espaces. Ainsi, il devient impératif de discuter des stratégies d'adaptation multicritères pour mieux répondre aux contraintes climatiques locales. En outre, étant donné que le processus de densification urbaine produit un impact important sur le bilan radiatif en ville, en particulier sur les enveloppes de bâtiments, il est important de caractériser la magnitude de cet impact selon les principaux paramètres climatiques et morphologiques. Par exemple, les obstructions hautes peuvent partiellement ou totalement bloquer la lumière du jour incidente et l'irradiation solaire par les effets d'ombrage. Mais sous les climats tropicaux, la captation de l'énergie solaire sur les toits de bâtiment semble très prometteuse, en raison de son abondance et de sa temporalité cohérente avec la demande : la pointe de production, souvent générée par les charges de climatisation, est produite au cours de la journée.

En répondant aux effets de la morphologie urbaine sur le potentiel de rayonnement solaire et de contrôle, cette étude explore un nouveau paradigme énergétique s'appuyant sur la production décentralisée d'énergie renouvelable dans les villes. Nous nous intéressons particulièrement à l'adaptation et à l'évolution du parc immobilier existant dans des quartiers à « énergie positive », en ajustant les éléments de la morphologie urbaine, tels que la densité bâtie, la géométrie et l'implantation des bâtiments.

Néanmoins, la définition de la morphologie des bâtiments, à l'échelle urbaine locale, s'appuie sur plusieurs paramètres au projet ainsi que sur plusieurs contraintes environnementales, ceux-ci augmentant avec la complexité de la conception. Par conséquent, le nombre de configurations

possibles augmente avec le nombre de paramètres du projet. Dans une modélisation à multiples critères pour la conception des bâtiments, cette complexité induite est aussi directement liée au temps et au coût de calcul. Pour ces différentes raisons, une méthodologie axée sur l'analyse globale et la conception optimale des typologies urbaines peut devenir très pertinente. En appliquant une telle méthodologie, nous cherchons à générer des connaissances sur l'importance relative de chaque variable de projet dans les phases amont de conception architecturale et urbaine, ainsi qu'à définir des configurations urbaines potentielles qui favorisent l'efficacité énergétique.

Ce travail de thèse propose une étude prospective sur la morphologie construite des typologies urbaines existantes dans les villes en climat tropical au Brésil. Une optimisation de l'énergie solaire incidente sur la surface extérieure des bâtiments est proposée, ce qui vise à favoriser, d'un côté, la production locale d'énergie sur les toits des bâtiments et, de l'autre, à réduire les apports solaires potentiels sur les façades verticales, tout en considérant des seuils d'éclairage naturel.

1.1. Jeux d'hypothèses

A partir des éléments de la problématique annoncée précédemment, quatre hypothèses principales peuvent être formulées :

Hypothèse 1: la forme et l'implantation des bâtiments, à l'échelle urbaine locale, peuvent modifier considérablement le potentiel solaire des villes.

Récemment beaucoup d'études ont abordé le thème de l'intégration de l'efficacité énergétique dans la pratique architecturale. Néanmoins, beaucoup de ces initiatives proposent des solutions qui favorisent l'utilisation raisonnée de l'énergie dans des bâtiments pris isolément, mais sans pour autant intégrer l'impact des bâtiments les uns sur les autres à l'échelle de la ville, ni l'influence de la forme urbaine dans la performance énergétique et la qualité environnementale de ces bâtiments.

Les questions sur l'économie d'énergie dans les bâtiments, ainsi que leur capacité d'en produire localement à partir d'une source renouvelable sont aussi des éléments importants dans la planification urbaine à l'échelle du quartier et de l'ilot urbain.

Ainsi, nous considérons que les aspects qui définissent la forme et l'implantation des bâtiments à l'échelle urbaine locale ont une influence déterminante sur le potentiel solaire de production énergétique (électrique, thermique et sur le niveau d'éclairage naturel), ainsi qu'un impact important sur la demande d'énergie associée aux apports solaires en région de climat tropical.

Hypothèse 2: les systèmes simplifiés d'indicateurs morphologiques du tissu urbain permettent d'identifier des typologies construites, d'aider à l'étude de leur performance énergétique et d'indiquer des tendances pour le développement des villes

La définition judicieuse de typologies urbaines de référence, à partir d'un ensemble d'attributs spatiaux et morphologiques qui caractérisent la forme, l'implantation et la densité bâtie, permet d'inférer sur la représentativité de la forme urbaine, d'aider à l'étude qualitative et quantitative du potentiel solaire de différents types urbains, ainsi que d'être employé en tant qu'instrument permettant de mesurer, réglementer et d'évaluer des tendances d'évolution de la morphologie construite des villes.

Hypothèse 3: une approche méthodologique pluridisciplinaire ancrée sur des méthodes de projet utilisant l'optimisation mathématique permet d'explorer et de produire des solutions innovantes correspondant des compromis raisonnables pour répondre aux problèmes multicritères de conception urbaine.

Le couplage méthodologique avec des outils issus d'autres disciplines, à l'exemple des méthodes classiques d'optimisation, peut contribuer à l'étude paramétrique des aspects qui définissent la morphologie urbaine, en favorisant la proposition de solutions d'adaptation aux typologies existantes. De plus, cette méthodologie peut aussi contribuer à la proposition d'indicateurs pour l'aide à la décision dans le cadre de l'élaboration ou l'évolution des codes d'urbanisme locaux, ainsi que pour des mesures ponctuelles d'intervention urbaine.

Comme alternative à la méthodologie classique de projet (par essai et erreur) ou aux méthodes discrètes de l'approche d'aide à la décision multicritère (par pondération et *ranking*), il est possible d'adopter des techniques d'optimisation capables de minimiser la subjectivité du processus et la dépendance à la répétition de nombreux cycles d'évaluation de la performance. Cette stratégie permet au concepteur d'évaluer les diverses configurations de modèles de façon automatique et dirigée, en l'assistant dans l'analyse et la compréhension du comportement des phénomènes physiques étudiés, comme dans le cas de ce travail, le bilan radiatif des surfaces.

Hypothèse 4: l'optimisation de la forme urbaine à partir d'objectifs énergétiques antagonistes permet de générer des opportunités de diversifier la densité urbaine construite et, par conséquent, le projet urbain.

La prise en compte des contraintes solaires pour le renouvellement et la conception de formes urbaines performantes, en vue de la recherche des solutions qui représentent un compromis entre la réduction de la demande et l'augmentation de l'offre d'énergie à l'échelle de l'ilot urbain, est une opportunité de proposer une plus grande diversité de densité, plus raisonnée mieux adaptée à la complexité de la morphologie construite des villes.

1.2. Objectifs du travail

Ce travail de recherche est une contribution prospective pour le renouvellement et la conception des villes à partir d'une approche énergétique, focalisée sur la forme construite à l'échelle de l'ilot urbain dans le contexte du climat tropical au Brésil. Le travail a pour but de réaliser une étude prospective sur le potentiel d'exploitation raisonnée de l'énergie solaire dans les typologies urbaines de référence d'une ville de climat tropical au Brésil, Maceió (AL).

L'étude cherche à répondre à quatre objectifs spécifiques:

- Identifier et classer les typologies urbaines les plus représentatives du tissu urbain de la ville de Maceió-Brésil.
- Etablir le bilan radiatif pour les typologies identifiées, en vérifiant leur potentiel solaire (thermique et photovoltaïque), le potentiel d'éclairage naturel et la réduction des apports solaires sur les façades des bâtiments.
- Réaliser une étude de sensibilité des principaux facteurs typo-morphologiques urbains vis-à-vis du bilan radiatif et de l'éclairage sur les enveloppes bâties.
- Réaliser une étude prospective des typologies urbaines possibles, basées sur celles identifiées initialement pour la ville de Maceió, sur le potentiel solaire des toitures et la réduction des apports solaire sur les façades verticales.
- Développer une approche nouvelle de l'aménagement pour le renouvellement et la conception urbaine, à l'échelle locale, de l'ilot urbain, afin de favoriser le potentiel de réduction de la demande et le potentiel d'offre énergétique pour les bâtiments urbains.

1.3. Approche méthodologique

Afin de tester les hypothèses formulées et de répondre aux objectifs proposés, cette recherche s'est appuyée sur une approche interdisciplinaire où différents modèles d'analyse ont été utilisés et associés. Ces modèles ont été choisis et employés en fonction de la nature du sujet d'étude et de l'objectif spécifique recherché. La méthode du travail peut être décrite selon trois étapes principales:

1.3.1. Première étape

Dans un premier temps, un cadre théorique sur les contraintes solaires dans le contexte urbain a été constitué. Ce cadre contextuel nous permettra d'identifier les jeux d'indicateurs et de paramètres descriptifs pertinents de la morphologie urbaine et de la performance des bâtiments.

A partir d'un jeu initial d'indicateurs de performance climatique de la morphologie urbaine, une étude de la forme urbaine est effectuée pour Maceió, afin d'identifier les typologies urbaines les plus représentatives de la maille urbaine de la ville. A partir d'un modèle SIG (Système d'Information Géographique), les données vectorielles urbaines de la ville sont maillées, en considérant une maille d'analyse de 500m x 500m (échelle de quelques ilots urbains) sur laquelle sont programmés et calculés l'ensemble des indicateurs morphologiques (par exemple, verticalité, prospect moyen, COS, CES, etc.). Les typologies urbaines existantes sont statistiquement classées (par Analyse en Composants Principales et Analyse de *clustering*), selon leurs caractéristiques typo-morphologiques.

Les typologies de référence sont évaluées selon leur bilan radiatif (de courte et grande longueur d'onde) et le niveau de lumière naturel présent sur les enveloppes, à l'aide d'un algorithme simplifié de radiosité (SRA) codé dans le logiciel Citysim (ROBINSON, 2011). Pour cela, ce modèle physique tient compte de tous les composantes du bilan radiatif en milieu urbain: le rayonnement direct, l'anisotropie du rayonnement diffus, les effets d'obstructions des bâtiments, les inter-réflexions de l'irradiation solaire

entre les murs des bâtiments et entre les bâtiments et le sol urbain, ainsi que les échanges radiatifs dans l'infrarouge (Figure 1).

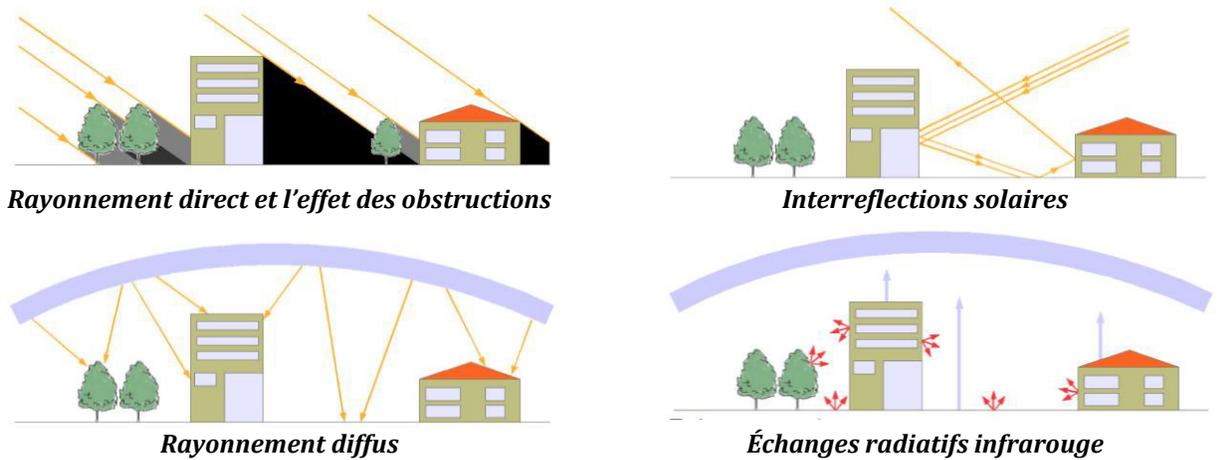


Figure 1: phénomènes radiatifs considérés dans le modèle d'analyse employé.

1.3.2. Deuxième étape

Les attributs morphologiques initialement considérés dans l'étude sont évalués au travers d'une analyse de sensibilité. Pour ce faire, nous mettons en œuvre un plan d'expérience par une méthode factorielle. Cette méthode permet d'identifier la magnitude d'effet de chaque facteur morphologique influençant différents niveaux de rayonnement solaire et d'éclairage sur les façades et toitures des bâtiments, ces variables réponses étant ensuite considérées dans un processus d'optimisation.

1.3.3. Troisième étape

Les typologies de référence sont paramétrées et soumises à un processus d'optimisation. Ce processus est automatisé en couplant l'algorithme SRA avec un algorithme évolutionnaire d'optimisation mathématique (NSGA-II - *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) à l'aide d'une plateforme multidisciplinaire d'optimisation, modeFRONTIER®. Dans cette approche multicritère, nous cherchons à aboutir simultanément au maximum de potentiel énergétique solaire pour un ensemble de bâtiments, à un minimum de demande d'énergie due aux charges thermiques issus des apports solaires, en prenant en compte l'échelle de variation de quelques variables contraintes par le règlement d'urbanisme local.

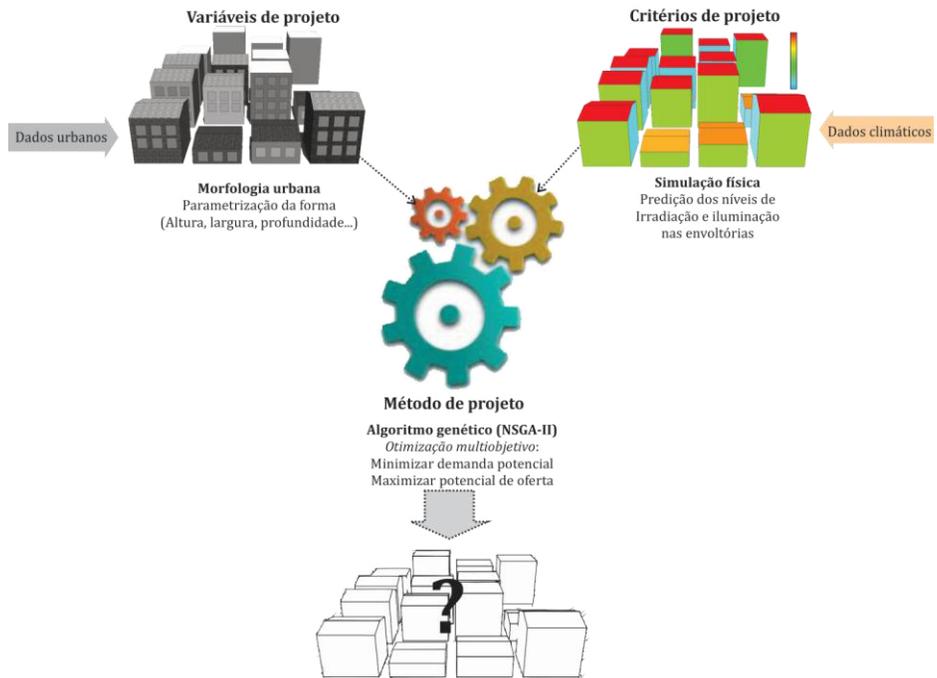


Figure 2: Approche méthodologique de la recherche.

2. ANALYSE MORPHO-SOLAIRE

Initialement, les données vectorielles sont traitées par le SIG, ArcMAP/ArcGIS®, ou un jeu d'attributs morpho-énergétiques sont calculés. Pour effectuer la caractérisation des structures urbaines prédominantes dans un tissu urbain donné, trois résolutions de maille de tailles différentes ont été initialement considérées (1000 m x 1000 m, 500 x 500 m et 250 x 250 m). Comme le choix d'un maillage induit un découpage des objets urbains (rues, bâtiments, etc.), cette définition peut être critique, selon les caractéristiques du tissu urbain. Les cellules de la maille ne doivent pas être trop petites, pour ne pas de représenter juste un fragment spécifique et réduit qui ne soit pas assez représentatif du tissu urbain, et pas trop grande non plus, en comprenant trop de structures différentes. Pour définir la résolution de maille la plus appropriée pour la ville étudiée, quelques tests statistiques ont été mis en œuvre pour analyser la prédominance des éléments à l'intérieur de ces trois résolutions spatiales. Les résultats de l'écart-type et la moyenne pour certains paramètres morphologiques sélectionnés, nous ont permis de choisir les mailles de 500m, qui dispose de 694 cellules d'évaluation.

Afin de définir quels seraient les attributs morphologiques clés pour l'étude, nous avons adopté la méthodologie d'Adolphe (2001). L'auteur a développé un système simplifié de modélisation spatial de la morphologie urbaine basée sur des critères climatiques. Ce travail a abouti à un ensemble de paramètres morpho-énergétiques pour l'analyse du tissu urbain. Un système d'indicateurs morphologiques est essentiel, car il permet aux aménageurs urbains d'avoir un contrôle plus important sur la performance de la forme urbaine et sur l'intensité du développement urbain. Les indicateurs principaux employés dans cette étude se trouvent indiqués dans le Tableau 1. Pour plus de détails sur la méthodologie et les hypothèses utilisées dans la définition de ce système d'indicateurs, voir Adolphe (2001) et Adolphe *et al.* (2002).

Pour établir une cartographie des types urbains, les résultats obtenus par le calcul des paramètres morphologiques pour chaque cellule de la maille considérée sont traités et analysés par une Analyse de Composantes Principales (ACP). L'ACP est une analyse statistique qui permet d'évaluer les interrelations entre un grand nombre de variables, en vue de compiler l'information apportée dans un nouvel ensemble plus restreint de variables. Cette technique statistique permet donc de minimiser les redondances qui peuvent exister, en permettant une plus grande variabilité des données, en quelques composantes, ce qui peut rendre plus facile la cartographie des informations (ALENCAR, 2009). Dans un deuxième temps, une analyse de groupement (*Clustering*) est mise en œuvre. Cette méthode statistique cherche à identifier et grouper les objets par similarité, par rapport à un ensemble d'attributs et en permettant l'identification d'un type de comportement. L'algorithme *Clustering k-means* (point *k* moyen) choisit une partition initial des données et modifie les membres des classes afin d'obtenir une nouvelle partition qui représente le mieux la structure des données initiales. Le point *k* moyen (*la moyenne de chaque attribut*) est attribué à la classe dont le centre est le plus proche (DIDAY, LEMAIRE, *et al.*, 1982).

Tableau 1: les indicateurs morphologiques principaux considérés dans l'étude.

Indicateurs morphologiques		Définition
<i>Rugosité absolu (m)</i>	Rh	Somme des hauteurs de bâtiments pondérées par leur surface et ramenées à la surface totale du tissu urbain considéré (bâti et non bâti).
<i>Porosité (/)</i>	Po	Rapport des volumes utiles ouverts à l'ensemble des volumes du tissu urbain considéré.
<i>Compacité (/)</i>	Cm	Rapport entre la surface d'enveloppe extérieure non-contiguë du bâtiment, et son volume élevé à la puissance 2/3.
<i>Contiguïté (/)</i>	Ct	Rapport de la surface verticale d'enveloppe adjacente à d'autres bâtiments sur la surface d'enveloppe donnant sur l'extérieur.
<i>Coefficient d'Occupation du Sol (/)</i>	COS	Rapport de la surface construite à la surface totale dans une aire urbain.
<i>Coefficient d'Emprise au Sol (/)</i>	CES	Rapport de la surface construite au sol à la surface totale dans une aire urbaine
<i>Prospect moyen (/)</i>	PM	Rapport de la hauteur moyenne des bâtiments d'une rue par sa largeur.
<i>Verticalité (/)</i>	V	Hauteur moyenne des bâtiments d'une scène urbaine par leur surface d'emprise.
<i>Nombre d'étages (/)</i>	NE	Hauteur totale des bâtiments divisée par la hauteur du plafond.
<i>Distance entre les bâtiments (m)</i>	DB	Distance minimale entre bâtiments.
<i>Épaisseur des bâtiments (m)</i>	EB	Moyenne des épaisseurs des bâtiments dans une aire urbaine
<i>Largeur des bâtiments (m)</i>	LB	Moyenne des largeurs des bâtiments dans une aire urbaine
<i>Hauteur des bâtiments (m)</i>	HB	Moyenne des hauteurs des bâtiments dans une aire urbaine
<i>Largeur de rue (m)</i>	LR	Moyenne de la distante qui sépare les parcelles dans une aire urbaine

2.1. Le bilan radiatif des surfaces urbaines

Afin de mesurer la disponibilité du rayonnement et de l'éclairement sur les façades, à l'échelle urbaine, nous avons choisi d'utiliser l'Algorithme Simplifié de Radiosité (SRA) (ROBINSON, 2011) codé dans le logiciel Citysim. Le SRA consiste en un couplage de modèles assez bien connus qui permettent de prévoir le flux d'énergie radiative arrivant sur les surfaces des bâtiments, en tenant en compte des effets des obstructions urbaines sur la réduction du rayonnement directe, l'anisotropie du diffus et la contribution du réfléchi. De même, le modèle estime la lumière du jour, compte tenu des effets des obstructions qui réduisent la vue de la voûte céleste, ainsi que la contribution de l'éclairement réfléchi. Le SRA est actuellement, un des quelques algorithmes permettant d'une part, une robustesse sur la modélisation de la complexité des échanges radiatifs à l'échelle urbaine du quartier et, d'autre part, la simulation couplée à des algorithmes d'optimisation. Toutefois, pour arriver à ce compromis entre robustesse et calcul rapide, le SRA s'appuie sur deux simplifications clés : toutes les surfaces urbaines sont considérées comme des surfaces lambertiennes (surfaces qui réfléchissent le rayonnement de manière uniforme dans toutes les directions) et la moyenne de la radiance d'une zone occluse d'une partie du ciel est égale à celle calculée au centre de la surface d'occlusion la plus importante dans cette partie. La précision de l'algorithme a été testée par comparaison des résultats, avec des scénarios identiques, avec un modèle de référence qui a été largement validé, le logiciel RADIANCE, en parvenant à un bon accord (ROBINSON, 2011). Une description plus détaillée de l'algorithme SRA peut être trouvée sur Robinson (2011).

Les variables d'entrée pour ce modèle numérique de calcul se composent d'un ensemble de paramètres climatiques, géométriques et des données thermo-physiques des bâtiments. Pour les paramètres climatiques, une année climatique complète a été générée à l'aide du banc de données Meteonorm (METEOTEST, 2011). Pour la géométrie, les typologies sont représentées en 3D par des coordonnées géo-référencées. Le SRA permet également la définition des obstructions lointaines dues à la topographie du site urbain. Le ratio de surface vitrée sur les façades est introduit en attribuant une fraction par face. Les spécifications thermo-physiques des bâtiments (ex. l'albédo, la transmittance thermique des surfaces vitrées, le facteur solaire, etc.) sont attribuées par enquête sur le terrain. Les variables de sortie considérées sont : l'irradiation solaire annuelle [kWh.(m².year)] (directe, diffus et la contribution réfléchie) et l'illuminance annuelle [lux] sur les façades des bâtiments.

Afin d'évaluer le potentiel solaire sur les toitures et la disponibilité de la lumière du jour sur les façades bâties, nous considérons certains seuils annuels, conformément aux procédures méthodologiques présentés dans (COMPAGNON, 2004), basées sur les hypothèses suivantes (COMPAGNON, 2004) (MONTAVON, 2010) (SCARAZZATO, 1995):

- les seuils requis pour la conversion de l'énergie solaire thermique et photovoltaïque sur les toitures, en considérant des conditions normales d'opération, correspondent à 600 [kWh/m².an] et 1000 [kWh/m². an], respectivement (COMPAGNON, 2004) (MONTAVON, 2010).
- L'illuminance moyenne sur les ouvertures verticales peut varier selon l'orientation de la façade. Si nous considérons 150 lux comme seuil intérieur au niveau du plan de travail au fond d'une pièce du bâtiment et nous le divisons par un coefficient de pondération lié à l'orientation de chaque façade (1,6 pour les façades au sud ; 1,3 pour les façades au nord ; 1,4 pour les façades à l'Ouest ; et 1,5 pour les façades à l'est), nous obtenons un éclairage par façade estimée de : 9375 lux pour la façade sud ; 11538 lux pour la façade nord ; 10741 lux pour la façade ouest ; et 10000 lux pour façade est (SCARAZZATO, 1995). Pour Maceió, la ville d'étude de cas, la journée utilisée sera le 11 août et les coefficients indiqués se réfèrent aux valeurs de seuil pour ciel couvert calculé pour cette ville (SCARAZZATO, 1995).

2.2. Application pour la ville de Maceió

Pour l'application de la méthode proposée, une étude de cas à Maceió a été mise en œuvre. La ville de Maceió se trouve à 9.45° de latitude sud et 35.42 ° de longitude ouest. Son centre urbain a une superficie de 510,655 km² pour une population de 936,608 habitants urbains (IBGE, 2010). En ce qui concerne son environnement urbain, Maceió comme plusieurs autres villes brésiliennes, a connu au cours de ces dernières décennies, une urbanisation très rapide et intense, mais sans qu'ait eu lieu un contrôle efficace, particulièrement en ce qui concerne les questions environnementales et d'infrastructures. Ce type de processus d'urbanisation a graduellement modifié le climat urbain local, ce qui affecte les conditions de confort thermique (à l'extérieur et à l'intérieur), ainsi que de la demande énergétique des bâtiments. À Maceió, le premier règlement d'urbanisme, créé en 1989 et revu en 2007, prend en compte un certain nombre de paramètres de forme des bâtiment (le coefficient d'occupation du sol, le coefficient d'emprise et les distance entre les bâtiments), mais est surtout focalisé sur l'occupation du sol et basé sur des questions foncières, patrimoniales ou hygiénistes.

En ce que concernent les caractéristiques climatiques de Maceió, l'énergie radiative présente de variations annuelles et saisonnières très faibles (Figure 3), démontrant son important potentiel pour engager de nouvelles stratégies énergétiques. Néanmoins, nous devons également garder à l'esprit, que dans les régions tropicales, nous avons aussi souvent des températures et des niveaux d'humidité de l'air très élevés, toute l'année (Figure 4). Du coup, suggérer une maximisation du niveau de rayonnement incident sur les bâtiments peut générer des surchauffes importantes et non souhaitables, dégradant les conditions de confort qui pourraient aussi amener à une augmentation de la consommation d'énergie. Ainsi, la révision des paramètres du règlement d'urbanisme local, notamment en ce qui concerne sa morphologie, basée sur des études climatiques plus précises, pourrait jouer un rôle décisif face à ces problématiques conflictuelles.

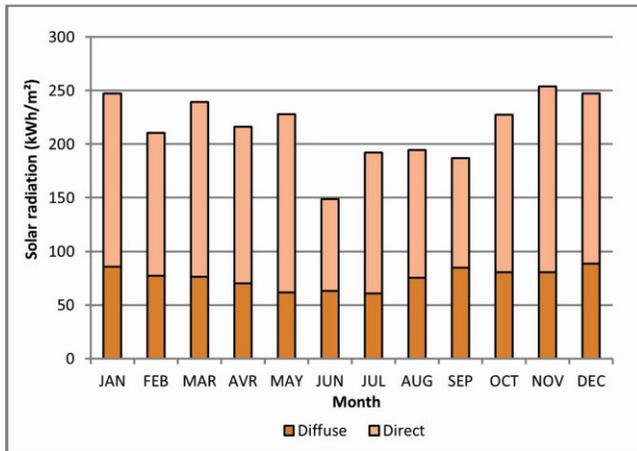


Figure 3: Moyenne mensuelle de l'irradiation solaire (directe et diffuse) pour Maceió (METEOTEST, 2011).

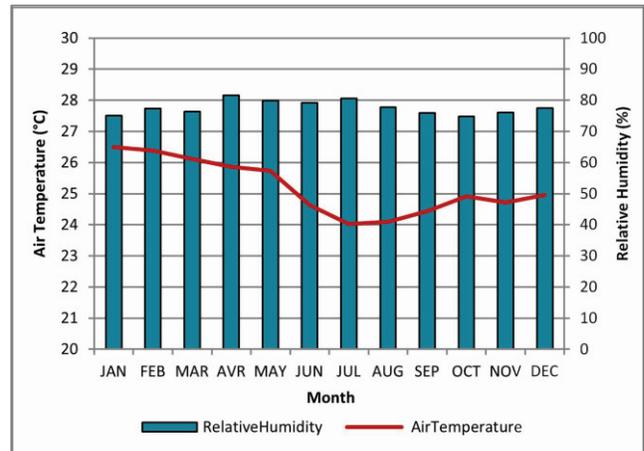


Figure 4: Moyenne mensuelle de température et humidité de l'air pour Maceió (METEOTEST, 2011).

2.2.1. Description des typologies urbaines de Maceió

L'analyse statistique de *Clustering* a convergé sur cinq catégories de données morphologiques qui ont été donc classées comme cinq typologies urbaines de référence : *individuel dispersé* ; *vertical bas* ; *colonial compact* ; *vertical moderne de grande hauteur* et *horizontal dense*. La carte ci-dessous représente la cartographie de la distribution de ces classes de référence pour toute la ville de Maceió (Figure 5). Il est à noter que les classes typologiques définies dans cette étude sont purement morphologiques et indépendantes de leurs usages.

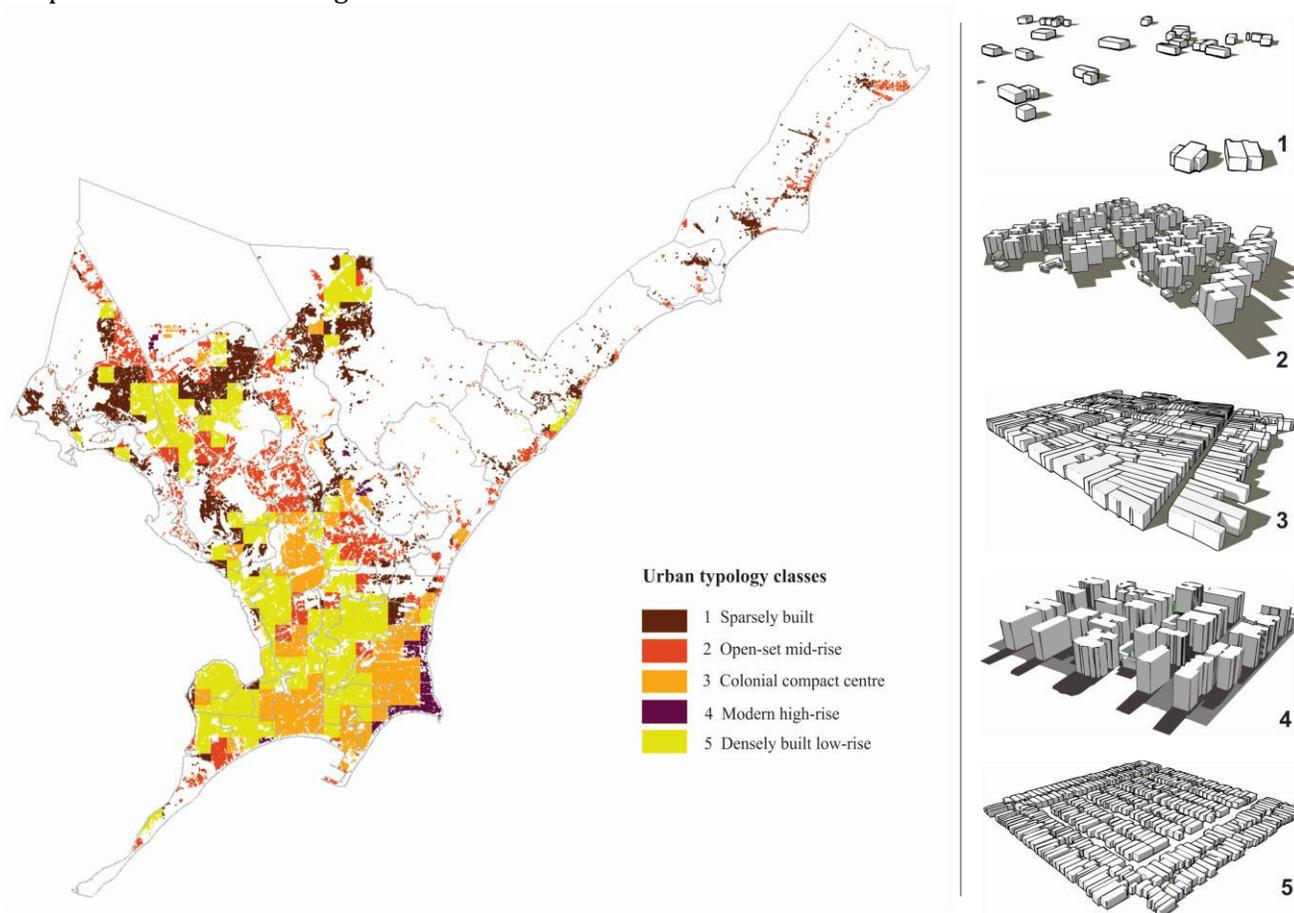


Figure 5: Distribution spatiale des typologies urbaines de référence sur le tissu urbain de Maceió, Brésil.

La classe 4 (vertical moderne) et la classe 3 (compact/colonial), qui peuvent être rencontrées toutes les deux sur la plaine maritime de Maceió (Figure 6), ont été choisies comme base pour les évaluations suivantes, étant donné la croissance rapide de classe 4 en remplacement de l'habitat individuel (parfois d'origine colonial) due à l'importante offre touristique et la spéculation foncière. En outre, la densification verticale rapide de ce site urbain a déjà imposé des nombreuses et sévères contraintes structurelles et environnementales, telles que des limitations d'approvisionnement d'eau et d'énergie. Les problèmes concernant l'approvisionnement en énergie sont liés à la saturation du réseau en raison de l'augmentation régulière de la consommation. Dans l'année 2000, une nouvelle sous-station d'alimentation électrique a été construite dans le quartier pour essayer de mieux répondre à la demande locale, mais elle a déjà démarré à sa capacité maximale (CRUZ, 2001).



Figure 6: processus de verticalisation et densification de la plaine maritime de Maceió. Source: image de l'auteur, 2013.

En ce qui concerne ses caractéristiques morphologiques principales, malgré la forte densité bâtie totale (COS de 4) cette typologie est contrastée par sa grande porosité, renforcée par l'actuel règlement d'urbanisme local qui impose des reculs progressifs de bâtiments à partir des limites de leur parcelle, ainsi qu'il limite la hauteur bâtie. Ainsi, la plupart des bâtiments présentent une forte compacité, une très faible contiguïté horizontale (Ct de 0,04), mais une contiguïté verticale très élevée (unités d'habitation à plusieurs étages). Ces caractéristiques jouent un rôle décisif sur la définition de la performance climatique et le potentiel de production d'énergie solaire des bâtiments, surtout parce qu'ils impactent sur la surface total exposée à l'environnement extérieur.

2.2.2. Une analyse morpho-solaire des typo-morphologies urbaines existantes

Un exemple représentatif de chaque typologie de Maceió est examiné sur la performance de son enveloppe (les surfaces de toiture et façades pondérées) en fonction de la disponibilité de l'irradiation solaire et l'éclairage naturel (Tableau 2).

Pour notre cas de base (classe 4), qui se caractérise par une verticalité importante (bâtiments jusqu'à 16 étages) et une forte densité bâtie, nous constatons un potentiel d'énergie solaire réduit, comparé aux autres typologies étudiées. En outre, les tours verticales impliquent la réduction de la surface de la toiture exposée par étage ou par unité d'habitation (due à sa forte contiguïté verticale). Sur les villes à basse latitude, les toitures peuvent correspondre à 2/3 du rayonnement solaire global reçu sur l'enveloppe des bâtiments (LIPPSMEIR, 1969). Ces caractéristiques morphologiques entraînent, d'une part une performance questionnable en termes d'accès à la lumière du jour dans les bâtiments et d'autre part, une réduction des apports de chaleur solaire. La charge thermique potentiellement produite par cette contribution solaire représente en moyenne 85% moins que dans les unités d'habitation isolées individuelles (classe 1 – individuel dispersé) en raison de la moindre exposition des surfaces horizontales moins exposées.

Tableau 2: paramètres spatiaux et performance climatique des cinq typologies urbaines de Maceió.

Indicateurs					
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Surface d'emprise du bâtiment (m ²) ou surface de toiture	1416.5	9492.0	31552.0	27190.4	22792.4
Surface totale bâtie (m ²)	1581.6	25615.7	93233.0	237367.8	34188.5
Nombre d'étages (/)	1.2	4.0	3.0	10.0	1.0
Surface d'enveloppe (m ²)	3050.4	39564.9	131376.0	15330.20	60617.9
CES (/)	0.8	0.2	0.75	0.49	0.56
COS (/)	0.1	0.9	2.4	4.2	0.75
Compacité (/)	4.8	5.1	3.9	5.0	3.6
Albédo (/)	0.12	0.18	0.15	0.20	0.15
Niveau d'illuminance des façades (Lux)	13060.4	8723.2	7706.9	1934.8	10782.1
Irradiation totale sur toitures (kWh/m ²)	2056.8	1970.2	1947.0	1930.2	2025.1
Irradiation totale sur façades (kWh/m ²)	364.3	337.3	287.9	312.8	307.2

Tableau 3: résumé du résultat des simulations et analyses portées pour la classe 1.

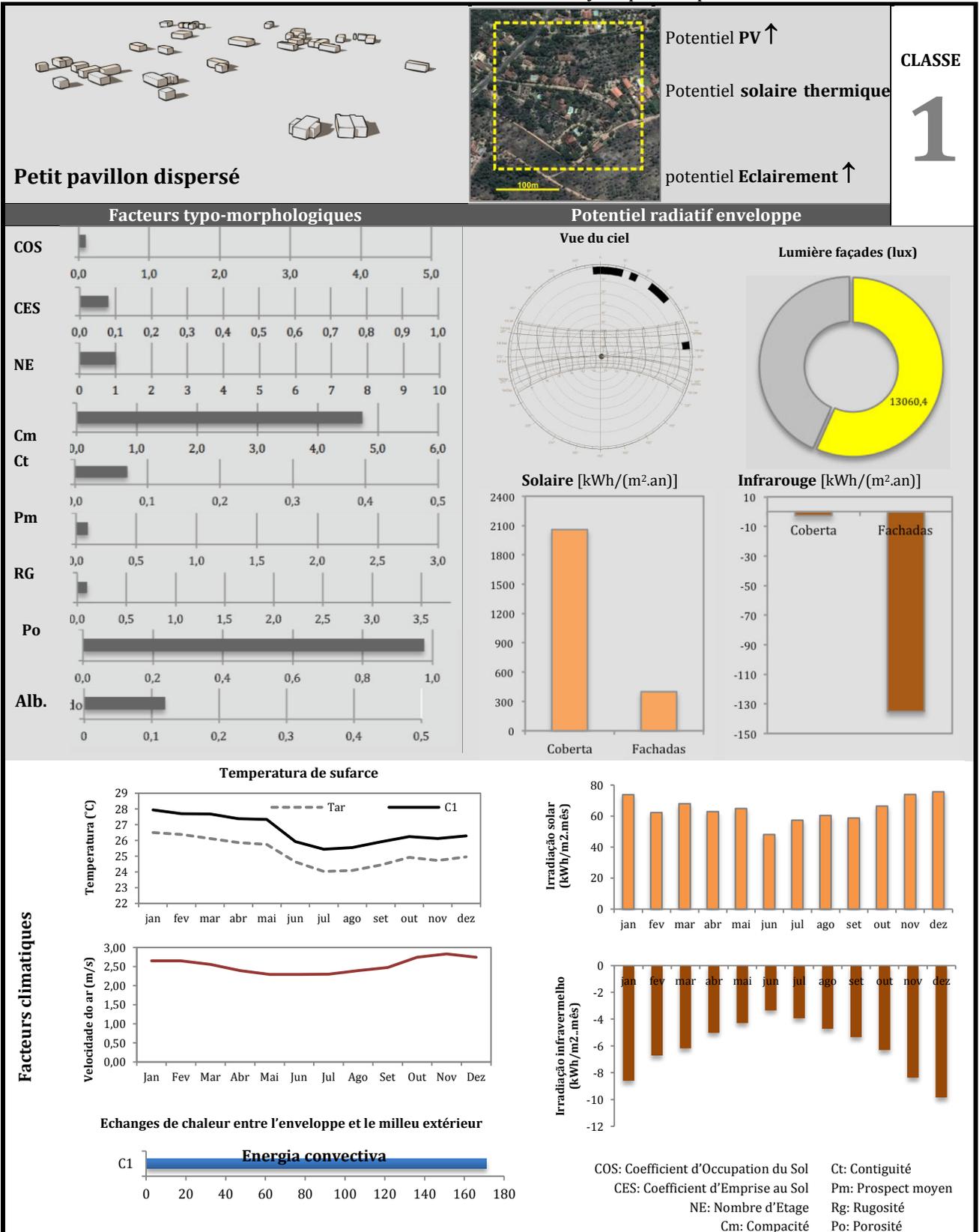


Tableau 4: résumé du résultat des simulations et analyses portées pour la classe 2.

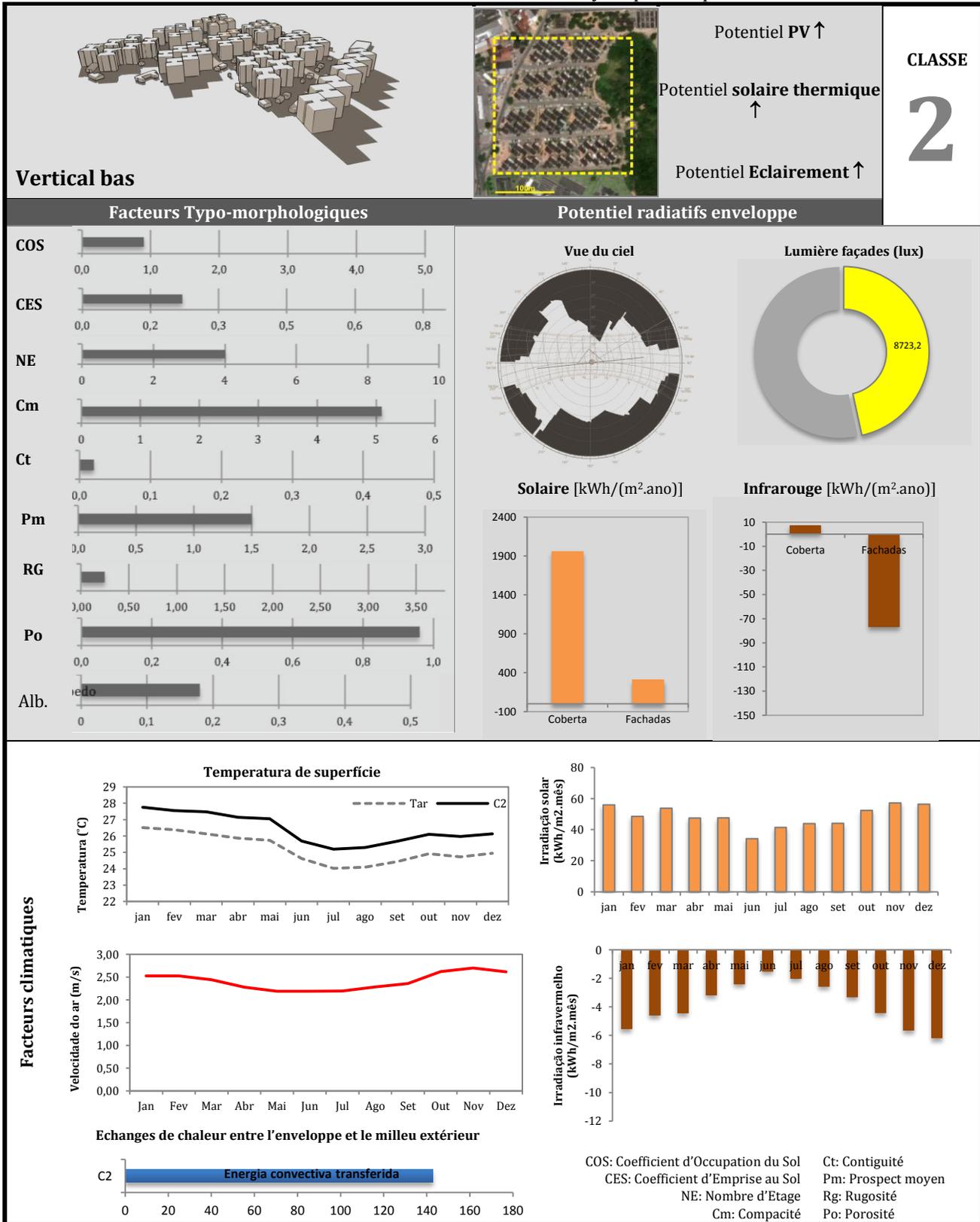


Tableau 5: résumé du résultat des simulations et analyses portées pour la classe 3.

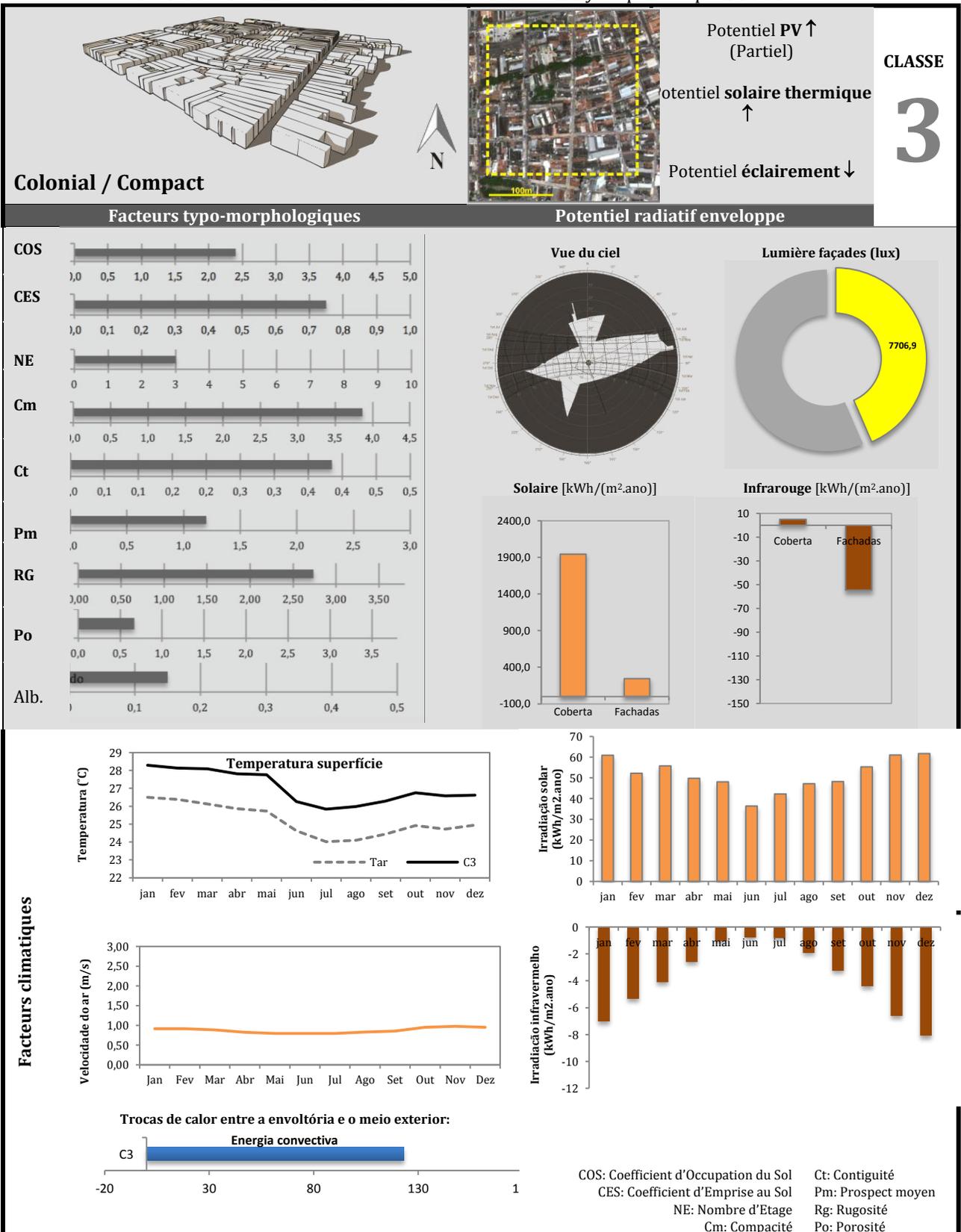


Tableau 6: résumé du résultat des simulations et analyses portées pour la classe 4.

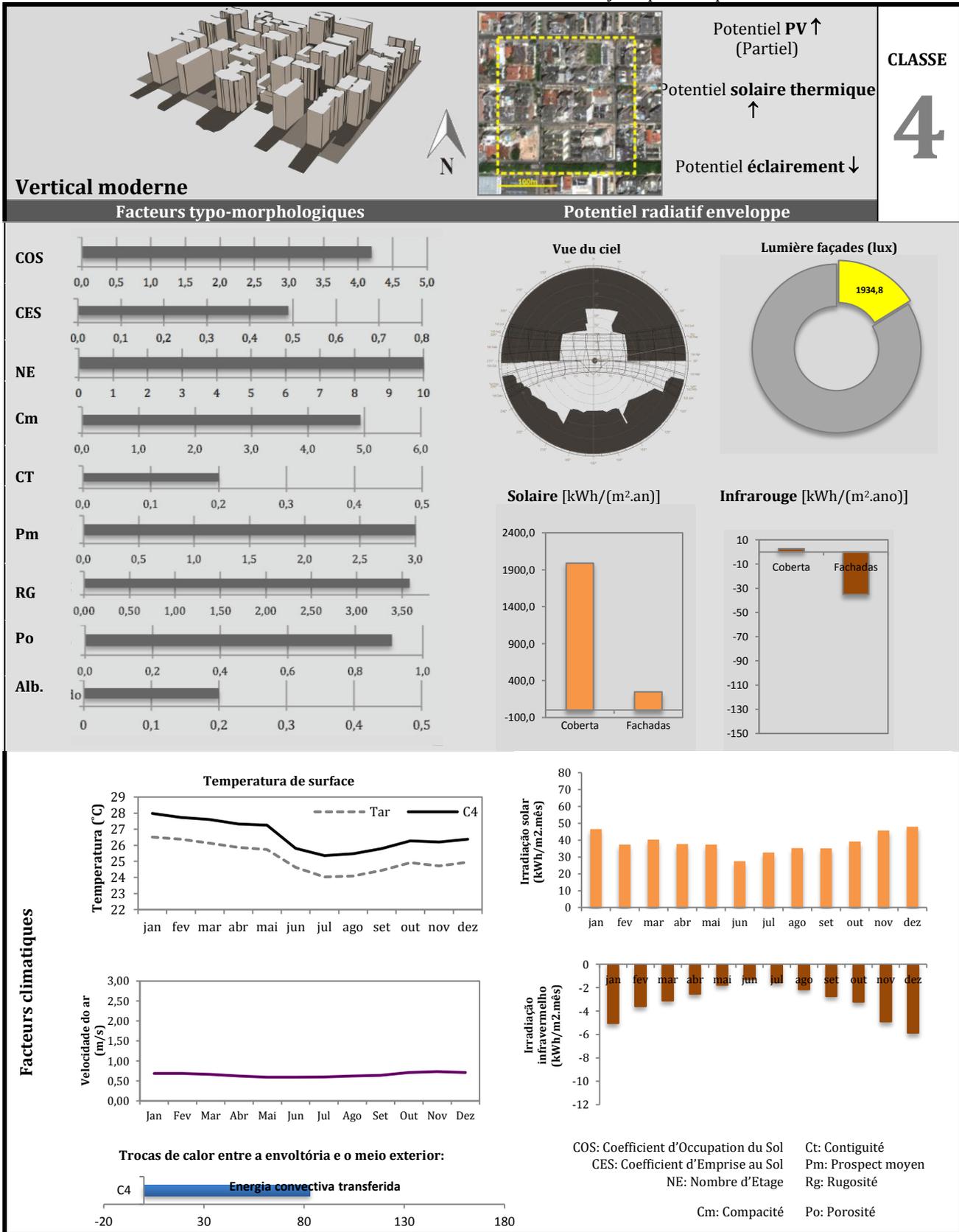
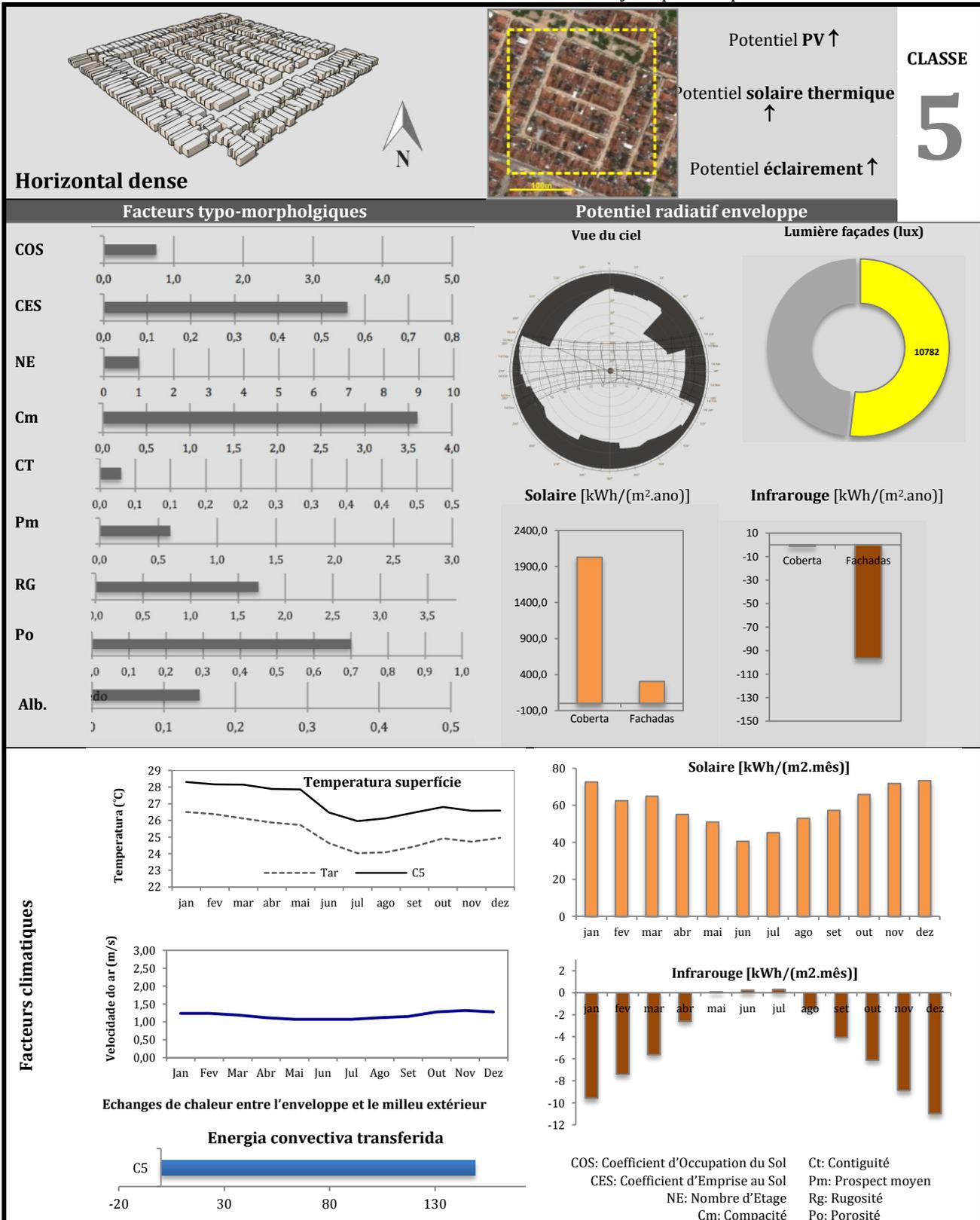


Tableau 7: résumé du résultat des simulations et analyses portées pour la classe 5.



3. MIS EN ŒUVRE D'UN PLAN D'EXPERIENCE

La morphologie urbaine possède un grand nombre de paramètres qui jouent un rôle important sur le climat urbain et, par conséquent, sur la demande et l'offre potentielle d'énergie dans les villes. Afin de mieux comprendre l'impact de ces facteurs, les études paramétriques sont souvent mises en œuvre. Cependant, ces études impliquent souvent un grand nombre des cas à modéliser. Effectuer des simulations dynamiques sur ordinateur sur plusieurs cas parfois aléatoires peut être une activité extrêmement laborieuse et un temps de calcul associé très important.

Une alternative efficace pour résoudre ce problème est la mise en œuvre d'un plan d'expérience (issu de l'anglais *Design of Experiments* – DOE) sur une analyse paramétrique de sensibilité (MONTGOMERY, 2001). L'utilisation originale des DOE fait référence aux méthodes utilisées pour obtenir des informations qualitatives les plus pertinentes d'une base de données d'expériences en faisant le plus petit nombre possible d'expériences. Selon ces méthodes, les expériences sont prévues de manière à ce que les observations redondantes puissent être éliminées sans aucune perte de représentativité, en réduisant le nombre d'essais afin de fournir des informations sur les interactions les plus importantes entre les variables (MONTGOMERY, 2001) (KLEIJNEN, 2005).

Le DOE fait généralement partie du processus d'optimisation et il doit toujours être appliqué avant la phase d'optimisation elle-même car il permet de procéder à une première exploration de l'espace de projet tout en établissant la relation entre les réponses mesurées et les facteurs impliqués dans le processus (variables de projet) étudiés. Cette méthodologie permet de créer une population initiale de projets candidats potentiels et également de réduire l'éventail des variations ou même de réduire le nombre de variables.

Pour bien mener la méthodologie DOE, nous commençons par identifier les variables d'entrée et les réponses d'intérêt, dont la sensibilité sera évaluée. Pour chaque variable d'entrée, plusieurs niveaux sont définis. Ces niveaux représentent la plage de l'effet désiré sur chaque variable. Les scénarios d'expérience sont ensuite définis sur une méthode spécifique de projet expérimental, qui définit chaque paramètre d'entrée pour chaque série de tests expérimentaux. Les réponses sont évaluées, en observant les différences possibles entre les groupes des changements d'entrée. Ces différences sont alors attribuées aux variables d'entrée individuellement (effet principal) ou en combinaison avec une autre variable d'entrée (effet d'interaction). Enfin, étant donné que les expériences sont constituées sur la base de la théorie statistique, une confiance dans les résultats obtenus est définie par un test statistique.

3.1. Méthode du Factoriel Fractionné

Afin de déterminer si un changement dans les valeurs variables de projet produit des modifications sur les résultats de l'irradiation et les niveaux de lumière du jour sur les surfaces des bâtiments, l'approche la plus intuitive serait d'essayer toutes les combinaisons possibles. Mais le nombre nécessaire d'expériences augmenterait géométriquement avec le nombre de variables. Au lieu de cela, une méthode factorielle fractionnée définit des ensembles d'expériences constitués à partir d'une fraction judicieusement choisie des expériences définies par une méthode factorielle complet. Cette fraction est choisie de manière à exploiter le principe de la rareté des effets (*sparsity of effects*) capable de fournir des informations représentatives sur les effets les plus importants liés au problème, tout en utilisant une fraction réduite de l'information par un plan factoriel complet en termes d'exécutions expérimentales et des ressources informatiques.

Un projet à deux niveaux est généralement suffisant pour évaluer l'effet de facteurs dans de nombreux problèmes scientifiques (MONTGOMERY, 2001). Les « expérimentateurs » qui évaluent les changements de processus sont souvent intéressés par les directions de l'effet des facteurs qui conduisent à l'amélioration du processus. Une demi-fraction des 2^k projets est généralement adoptée car elle n'implique que l'exécution de la moitié des traitements d'un factoriel complet. Pour cette étude, comprenant 14 variables de projet urbain (voir Tableau 8), un plan factoriel complet définirait 16384 expériences (2^{14}). Une demi-fraction de cette factorielle de projet demanderait donc 8192 séries de tests.

3.2. Test d'hypothèse statistique

A fin vérifier le seuil de signification des variables de projet et leur interaction sur les variables de réponse, un test statistique est appliqué à l'aide de données tirées à partir d'un essai expérimental contrôlé. Dans cette étude, les données sont obtenues par des simulations dynamiques sur la réponse en terme d'irradiation sur les modèles géométriques des façades des bâtiments urbains. Chaque expérience définie par la méthode factorielle fractionnée représente une configuration urbaine spécifique. Un résultat est statistiquement significatif s'il est improbable qu'il ait eu lieu par hasard, selon un seuil prédéterminé appelé le niveau de signification. Les tests sur les hypothèses statistiques et sur l'estimation de l'intervalle de confiance de paramètres sont les méthodes fondamentales utilisées pour l'évaluation de l'expérience comparative.

Pour une telle analyse, on doit formuler une hypothèse à tester : la valeur nulle et les hypothèses alternatives. Nous affirmons que les quatorze facteurs typo-morphologiques urbains étudiés représentent un impact significatif sur le niveau d'éclairement et d'irradiation sur toutes les surfaces construites dans n'importe quelle scène urbaine dans le contexte climatique tropical.

La décision de rejeter ou non l'hypothèse nulle peut être pris en fonction d'un intervalle de confiance. Ici, nous considérons un intervalle de confiance de 95%, correspondant à une signification de 0,05. Afin d'évaluer l'importance de l'effet de variables de projet sur les variables de réponse un *test-t de Student* est considérée.

3.3. Description du model urbain pour le plan d'expérience (DOE)

Pour l'analyse de sensibilité des facteurs morphologiques considérés, nous utilisons un modèle urbain simplifié, à partir duquel il est possible de créer des variations contrastées suivant la méthode d'analyse statistique. Un modèle urbain simplifié composé de 25 bâtiments est considéré ; pour chacun nous faisons varier toutes les dimensions d'un bâtiment (largeur, épaisseur et hauteur) et les espaces entre eux, comme le montre la figure 4 ci-dessous. A partir de ces variables de base, il est possible d'évaluer les variations de l'ensemble de tous nos facteurs morphologiques (Tableau 8). En outre, quelques caractéristiques principales de l'enveloppe du bâtiment sont également évaluées, notamment le ratio de vitrage, l'albédo, la transmittance thermique des murs, le facteur solaire et la transmittance thermique du vitrage. Dans cette première analyse, un large éventail de valeurs possibles pour chaque variable est examiné (Tableau 8), indépendamment des règlements urbains ou des bonnes pratiques. La composition de l'espace de recherche statistique doit être aussi complète que possible permettant de mieux mesurer la sensibilité de chaque facteur sur les variables réponses, tout en évitant les biais ou les redondances sur les résultats.

Tableau 8 : les intervalles des valeurs possibles (max et min) des facteurs principaux qui définissent les modèles urbains considérés.

Hauteur	Largeur (X)	Épaisseur (Y)	Distance entre bâtiments	Facteur solaire vitrage	Transmittance thermique vitrage	Transmittance thermique murs	Ratio de vitrage	COS	CES	Compacité	Verticalité	Prospect moyen	Albédo
m	m	m	m	/	W/m ² K	W/m ² K	%	/	/	/	/	/	/
3	4	4	3	0.1	1.3	0.7	0.2	0.3	0.05	0.4	0.01	0.6	0.1
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
50	40	40	30	0.9	5.0	4.8	0.9	10.3	0.85	1.0	0.8	3.9	0.9

Dans cette étude, deux variables de réponse sont considérées : l'irradiation et le niveau d'éclairement sur l'enveloppe de bâtiment. Les statistiques annuelles sont considérées comme base d'une échelle de temps d'analyse, puisque dans certaines régions tropicales, comme à Maceió, les variations saisonnières du climat peuvent être relativement faibles (Figure 3). En ce qui concerne l'échelle spatiale,

nous réalisons une analyse de la forme urbaine à l'échelle du voisinage (jusqu'à 500 x 500 m) et son influence sur un îlot urbain composé de neuf enveloppes bâties (voir Figure 7).

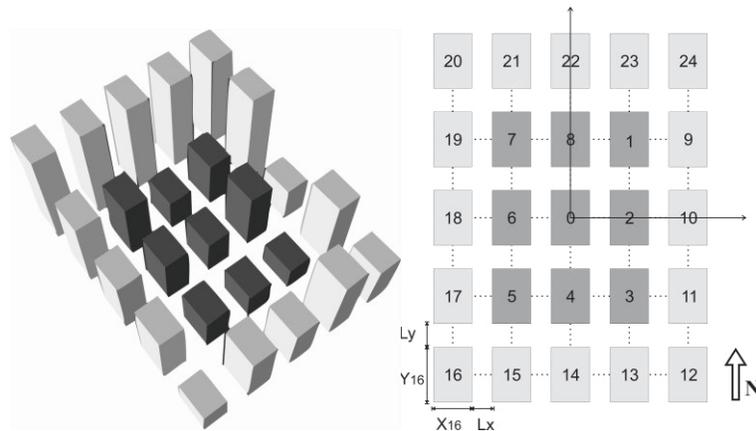


Figure 7: modèle urbain simplifié utilisé dans l'étude statistique.

3.4. Analyse de sensibilité des paramètres typo-morphologiques

A partir du test statistique global (*overall student test*), le prospect moyen (PM), la distance entre les bâtiments (DB) dans les deux axes (Nord-Sud et Est-Ouest) et l'albédo, sont identifiés comme des facteurs produisant des effets les plus pertinentes sur la modification de l'irradiation solaire, ainsi que sur les niveaux d'éclairage des surfaces de bâtiments, mais de différentes manières. L'albédo et le PM contribuent à plus de 50 % de l'impact global de l'irradiation sur les toitures, avec une participation plus importante du PM (27 %). Par rapport aux surfaces verticales, l'impact global de ces variables de projet urbain peut atteindre 75 % sur la façade sud. La pertinence de l'impact de ces variables sur le potentiel d'énergie solaire et sur la consommation d'énergie a déjà été soulignée précédemment (MONTAVON, 2010) (ADOLPHE, CHÂTELET, *et al.*, 2002), mais leur magnitude et leur importance relative, notamment dans les milieux de climat tropical, n'a pas encore été mesurée et cela peut être très utile à la priorisation de certaines décisions urbaines.

Pour identifier et qualifier l'intensité de ces effets, les facteurs sont analysés individuellement concernant les deux réponses (Figure 8, Figure 9 e Figure 10).

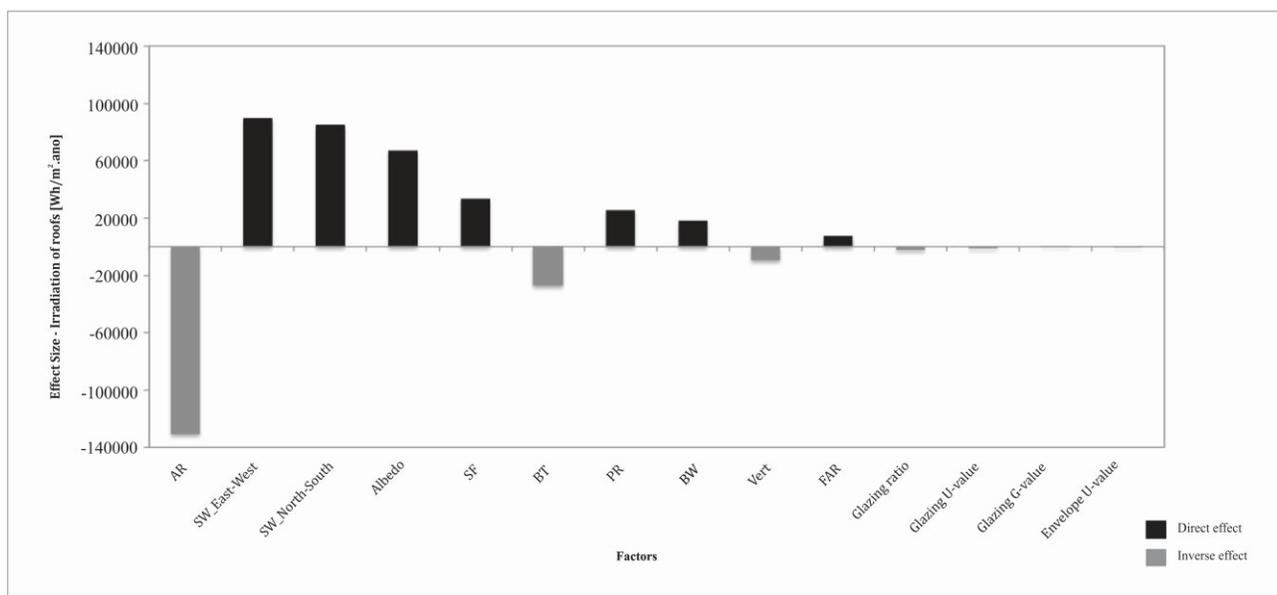


Figure 8: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'irradiation solaire sur les toitures des bâtiments.

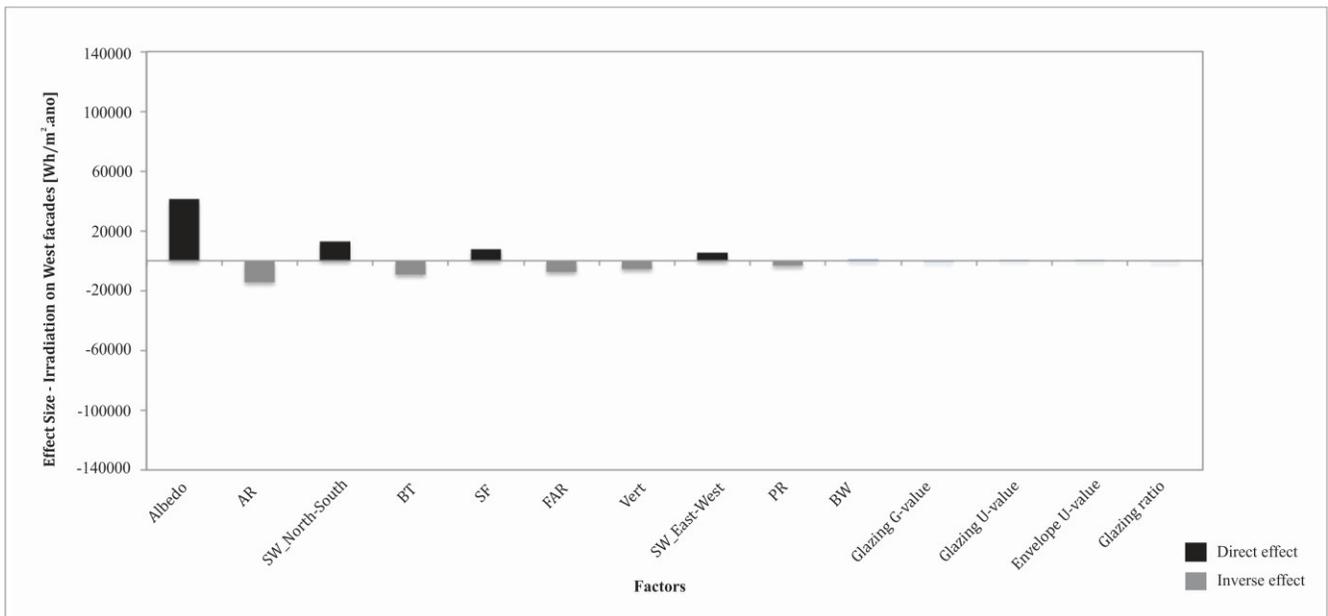


Figure 9: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'irradiation solaire sur la façade Ouest des bâtiments.

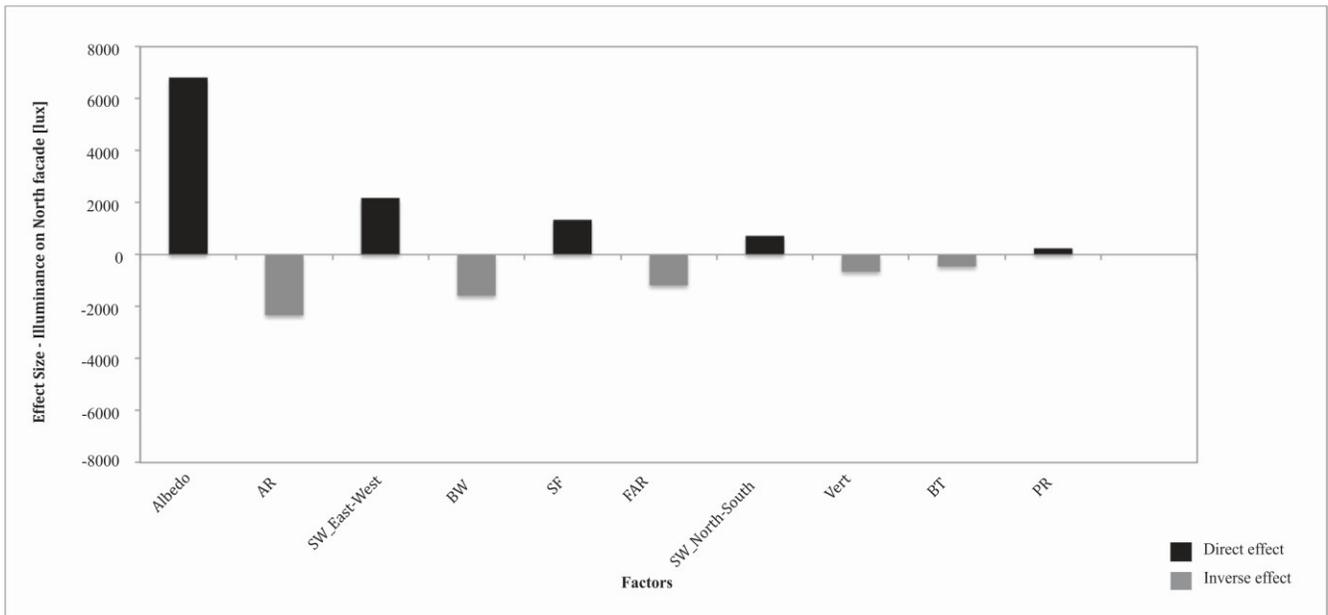


Figure 10: magnitude d'effet de tous les facteurs concernant l'illuminance sur la façade Nord des bâtiments.

Comme indiqué précédemment, l'hypothèse nulle indique que la variable ne produit pas d'effet significatif sur la réponse. Un intervalle de confiance de 95 % est considéré ici, ce qui représente un seuil de signification de 0,05. Les tableaux 9 et 10 ci-dessous présentent les résultats des données significatives obtenues par les tests concernant l'effet de l'irradiation solaire sur les toitures et les façades. Les tableaux présentent des informations sur l'effet, la signification et le test statistique t-student. L'effet indique la relation entre le facteur et la variable de réponse : les valeurs négatives indiquent que la relation est inversée.

Tableau 9: signification des résultats des tests statistiques concernant l'irradiation solaire sur les toitures des bâtiments.

Facteurs	Taille d'effet	Signification	t-Student
Prospect moyen	-130810.30	0.00	9.26
Distance entre bâtiments (E-O axe)	89584.00	0.00	8.38
Distance entre bâtiments (N-S axe)	84973.60	0.00	7.84
Albédo	67109.60	0.00	5.93
Compacité	33496.10	0.00	2.49
Epaisseur des bâtiments	-26749.70	0.02	2.23
CES	25425.80	0.02	2.23

Tableau 10: signification des résultats des tests statistiques concernant l'irradiation solaire sur les façades des bâtiments..

Facteurs	Taille d'effet	Signification	t-Student
Albédo	413573.36	0.00	28.95
Prospect moyen	-143329.97	0.00	4.13
Distance entre bâtiments (N-S axe)	129649.06	0.00	4.55
Epaisseur des bâtiments	-92309.29	0.00	3.17
Compacité	77581.60	0.00	2.34
COS	-74298.12	0.02	1.95
Distance entre bâtiments (E-O axe)	54544.59	0.03	1.85

Tableau 11: signification des résultats des tests statistiques concernant le niveau d'illuminance sur la façade Nord des bâtiments

Facteurs	Taille d'effet	Signification	t-Student
Albédo	6817.85	0.00	25.76
Prospect moyen	-2331.10	0.00	3.30
Distance entre bâtiments (E-O)	2173.08	0.00	4.48
Largeur des bâtiments	-1577.27	0.00	3.19
Compacité	1337.91	0.00	2.96

Les résultats semblent cohérent en ce que concerne les réponses (l'irradiation et l'illuminance) attendues pour les configurations urbaines. L'albédo présente une importante influence directe sur les réponses. Plus l'albédo de la surface urbaine (la réflectance) est important, plus grande sera l'échange d'irradiation solaire entre eux (la réflexion) et plus important sera l'éclairement lumineux sur les façades. Pour le PM (ratio de la hauteur des bâtiments sur la largeur de la rue), cela indique un effet inverse : plus la hauteur des bâtiments est importante par rapport à la distance entre eux, plus l'ombre portée sur les toitures et les façades sera importante, ce qui peuvent réduire la réponse globale en termes d'incidence du rayonnement et de lumière du jour reçue sur les surfaces des bâtiments.

En ce qui concerne *la distance entre les bâtiments* (DB) sur les deux axes de rues (Nord-Sud et Est-Ouest), ce paramètre présente un effet direct important sur les variables de réponse. Plus les bâtiments sont espacés entre eux, plus importante sera la disponibilité de l'irradiation et le niveau d'éclairement sur les surfaces en raison de la moindre d'obstruction par rapport au soleil et à la voûte céleste. Parmi les autres variables influentes, la *compacité* a présenté un effet direct. Cela pourrait s'expliquer par l'influence des inter-réflexions entre les surfaces verticales. Plus la surface d'enveloppe par rapport au volume bâti est élevée, plus importante est le niveau d'éclairement sur les façades. Le même comportement est identifié pour l'irradiation sur les façades, ce qui peut aussi représenter des apports de chaleur solaire très importants sur les bâtiments.

Selon l'intervalle de confiance adoptée dans cette étude (de 95 %), sept facteurs typomorphologiques pourraient être mis en évidence par rapport à leur influence pertinente sur la réponse de l'irradiation, aussi bien sur les toitures et que sur les façades : le prospect moyen, la distance entre bâtiments, l'albédo, la compacité, l'épaisseur des bâtiments, les coefficients d'emprise et d'occupation du sol (Tableaux 9 et 10). Concernant la réponse de l'éclairement sur les quatre façades orientées, les cinq paramètres morphologiques plus significatifs sont : l'albédo, le prospect, la distance entre bâtiments, la compacité et l'épaisseur des bâtiments (Tableau 11).

A partir des informations obtenues jusqu'à présent, nous avons vérifié que les variables : *la largeur des bâtiments, la verticalité, le ratio de vitrage, le facteur solaire, la transmittance des vitrages et des*

murs ne sont pas suffisamment pertinents pour être considérés comme des paramètres significatifs. À l'exception de la largeur de bâtiments et la verticalité, ce résultat était attendu, puisque nous ne prenons en compte que les données obtenues pour les surfaces extérieures des bâtiments.

De toutes façons, il est nécessaire d'évaluer l'effet de l'interaction entre ces variables de projet avant que nous en tirions des conclusions. Pour ce faire, le graphique des quantiles demi-normaux des effets, basé sur les valeurs absolues de l'effet estimé sur les probabilités normales cumulatives, a été mis en œuvre (MONTGOMERY, 2001). Un graphique normal est utile pour distinguer les effets les plus importants (à haut et à droite) et les moins importants (en bas et à gauche), en considérant les effets principaux aussi que ceux d'interaction de premier ordre. Une interaction forte signifie que l'effet d'une variable dépend de la réponse d'une autre. Dans les graphiques ci-dessous (Figures 9-11), les carrés noirs représentent l'effet direct sur la réponse : lorsque la valeur d'une variable augmente, la valeur de la réponse augmente également. De même, l'effet inverse dans la réponse est représenté par les carrés gris.

A partir de la Figure 11 ci-dessous, il est possible de vérifier les mêmes effets principaux que dans l'analyse précédente, démontrant encore la grande influence du *prospect moyen* et de *la distance entre les bâtiments* (sur les deux axes) sur l'irradiation des toitures. En outre, il est également possible de vérifier l'effet d'une interaction très remarquable entre ces variables et le facteur COS. Ces résultats semblent fiables étant donné que le COS représente la relation entre l'emprise du bâtiment (et, par conséquent, la disponibilité de surface de toiture) et le nombre d'étages, qui ont un effet direct important sur le niveau d'irradiation sur les toits. Plus la surface construite est importante, plus d'énergie radiante reçue est importante.

Si nous observons les résultats pour les façades (Figure 12), on y voit aussi l'effet principal de l'albédo, mais également les effets de l'interaction entre celui-ci et les autres facteurs morphologiques qui individuellement présentaient une influence négligeable dans l'analyse précédente – tel que la *verticalité*, le COS et le CES. Si l'albédo représente individuellement un effet direct important, lorsqu'il interagit avec les autres variables morphologiques, ces derniers semblent imposer une influence majeure et l'effet s'avère inversé. Ces variables présentent donc un poids supérieur dans l'interaction, ce qui signifie que, indépendamment de la variation de l'albédo, une densité plus élevée peut amener à une réduction de l'irradiation et de l'éclairage sur les surfaces verticales. Ce résultat peut être attribué à l'important impact de l'obstruction du ciel par les bâtiments voisins. Toutes les quatre façades ont présentées des résultats similaires, à l'exception de l'importante influence des facteurs liés à l'orientation, tels que l'épaisseur et la largeur, qui, suivant l'orientation de la façade, pourront présenter des valeurs différentes.

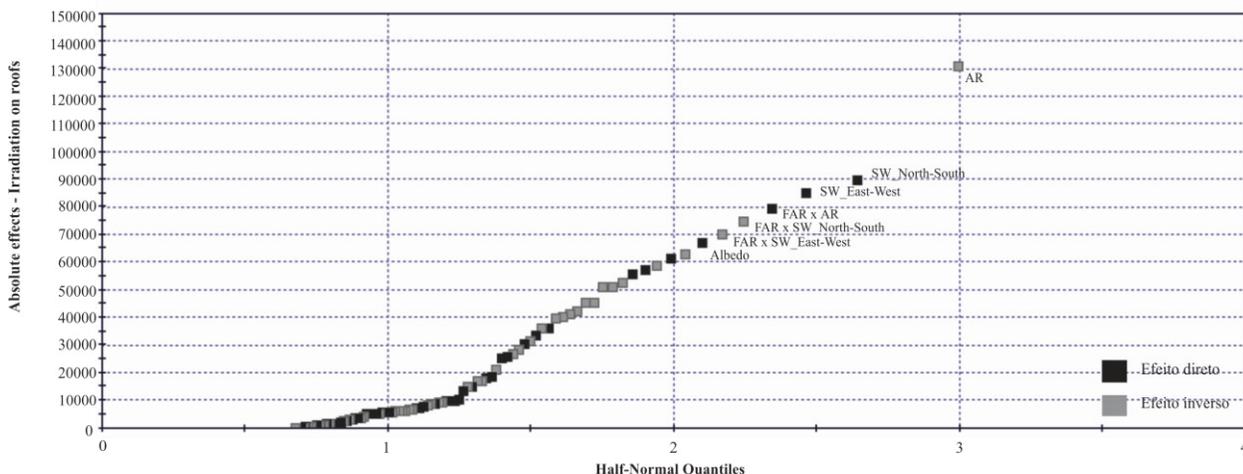


Figure 11: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'irradiation sur les toitures.

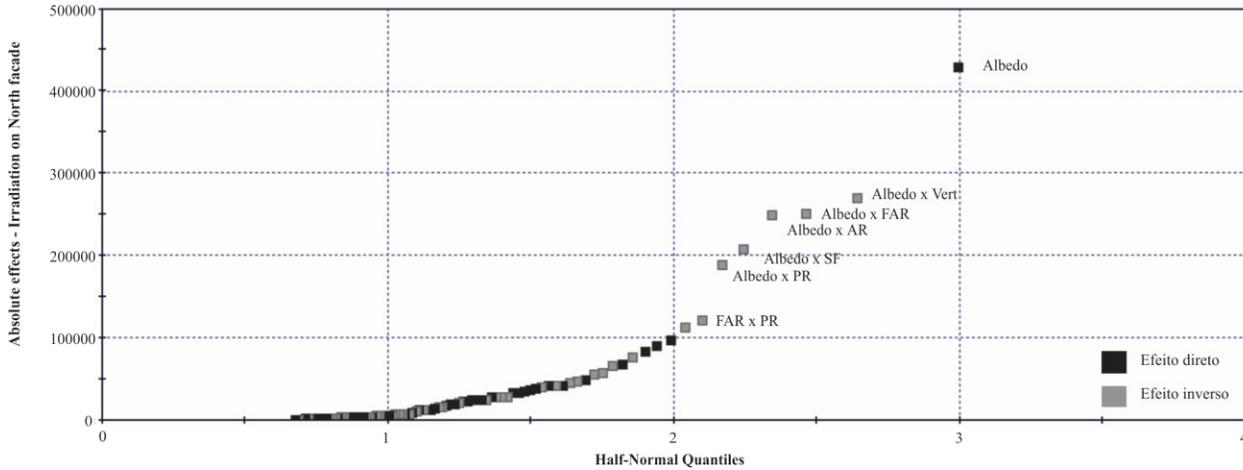


Figure 12: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'irradiation sur les façades Nord.

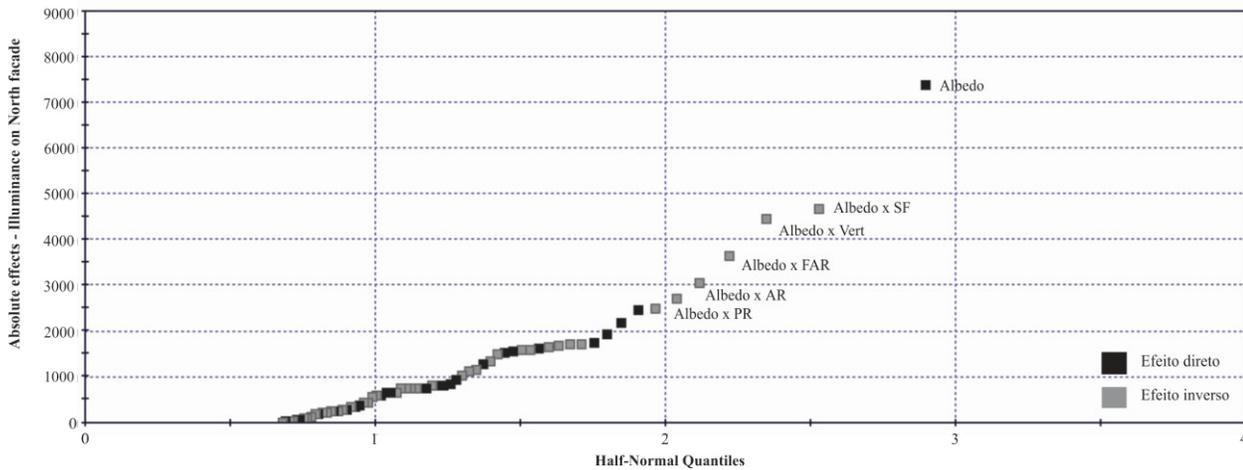


Figure 13: graphique des quantiles demi-normaux des effets concernant le niveau d'illuminance sur les façades Nord.

A partir des résultats obtenus dans cette analyse de sensibilité, nous avons pu vérifier que les facteurs suivants: *largeur du bâti, ratio de vitrage, facteur solaire, transmittance thermique du vitrage et des murs* – ne présentent pas d'effet principal ni d'effet d'interaction statistiquement significatif concernant les réponses étudiées. C'est-à-dire qu'il n'y a pas assez de preuve statistique pour affirmer que des variations sur ces facteurs produiront des modifications qui soient significatives sur la réponse d'irradiation et l'éclairage sur les surfaces extérieures des bâtiments. Ainsi, il est possible de les considérer comme des variables constantes pour des analyses subséquentes, comme lors d'un processus d'optimisation, sans qu'il n'y ait de perte de représentativité sur le problème formulé.

4. LA METHODOLOGIE D'OPTIMISATION

La difficile gestion des processus de décision a conduit vers le développement de différentes méthodes d'évaluations multicritères (WRIGHT, LOOSEMORE e FARMANI, 2002), notamment des méthodes d'optimisation. De nombreuses études d'optimisation ont été menées dans plusieurs champs thématiques, tels que la conception architecturale et urbaine (MAGNIER e HAGHIGHAT, 2010) (KAMPF, MONTAVON, *et al.*, 2010) (MONTAVON, 2010).

En général, l'optimisation désigne l'acte d'obtenir le meilleur résultat compte tenu des certaines circonstances données par la sélection du meilleur élément d'un ensemble de solutions disponibles. L'objectif principal de cette méthodologie est de minimiser ou de maximiser une mesure d'efficacité, qui doit être exprimée en fonction de certaines variables de décision « réelle ». L'optimisation consiste donc en un processus de recherche de valeurs de variables, à partir desquelles un ensemble restreint donne la valeur maximale et minimale de la fonction réelle exprimée et soumise à un certain nombre de contraintes. Les variables de projet sont constituées des paramètres dont les valeurs peuvent varier librement afin de définir une structure urbaine. Les contraintes de projet représentent les restrictions qui doivent être respectées pour produire un projet faisable et acceptable. En général, l'optimisation vise à choisir le meilleur projet basé sur les fonctions objectives définies.

4.1. L'optimisation multi-objective et l'algorithme NSGA-II

Dans certaines situations, le besoin de considérer plusieurs critères à satisfaire simultanément peut exister. Ces problèmes sont généralement appelés multi-objectifs (DEB, 2001) (COELLO, LAMONT e VELDHUIZEN, 2007). Également connu comme des problèmes multicritères, ils peuvent être menés dans les divers domaines où des décisions optimales doivent être prises, face à un compromis entre deux ou plusieurs des objectifs contradictoires.

Pour des problèmes multi-objectifs non triviaux, on ne peut pas identifier une solution unique qui optimise simultanément chaque objectif. Les algorithmes multi-objectifs cherchent des solutions telles qu'il soit impossible d'améliorer un critère sans empirer l'autre. Ces solutions sont appelées solutions non-dominées ou projets de Pareto. Trouver ces solutions non-dominées est l'objectif lorsqu'on met en place une démarche d'optimisation multi-objectif. Dans l'absence de toute information complémentaire, une des solutions optimales de Pareto ne peut pas être considérée meilleure qu'une autre. Cela demande que l'algorithme puisse trouver le plus grand nombre possible des solutions de Pareto et ensuite d'évaluer ces solutions pour n'en choisir qu'une seule. Ces algorithmes d'optimisation multi-objectifs sont catégorisés en tant que méthodes classiques et évolutives.

Les méthodes d'optimisation classiques suggèrent de « normer les échelles » (*scalarizing*) de l'ensemble des objectifs en un seul objectif en multipliant chaque objectif par un poids défini par l'utilisateur (MARLER e ARORA, 2010) (SCHAFFER, 1984) (DAS e DENNIS, 1998). On peut trouver une liste de quelques méthodes couramment utilisées d'optimisation multi-objective classique (DEB, 2001).

En revanche, les algorithmes évolutionnaires multi-objectif (AEMO) reposent sur des principes évolutifs naturels, tels que la reproduction, la mutation et la sélection, afin de définir le processus d'optimisation. Les solutions candidates pour le problème d'optimisation jouent le rôle des individus dans une population, et la fonction d'adaptation (*fitness*) détermine l'environnement au sein duquel les solutions vont survivre ou pas. L'évolution de la population a lieu après l'application répétée d'opérateurs évolutionnaires.

Parmi les méthodes d'optimisation multi-objectives évolutionnaires nous pouvons citer : VEGA (SCHAFFER, 1984), MOGA (FONSECA e FLEMING, 1993), NPGA (HORN e NAFPLIOTIS, 1993),

(SRINIVAS e DEB, 1994) et NSGA-II (DEB, PRATAP, *et al.*, 2002). Zitzler, Deb et Thielier (2000) présente une comparaison entre les différentes méthodes. Ces méthodes ont été utilisées également pour résoudre des problèmes de projet architecturaux et urbains (MAGNIER e HAGHIGHAT, 2010) (GRIEGO, KRARTI e HERNANDEZ-GUERRERO, 2012). Basé sur des applications bien réussies avec l'utilisation de la méthode NSGA-II, un des MOEA les plus efficaces (COMPAGNON, 2000), ce travail a choisi d'utiliser cette méthode particulière pour l'optimisation de modèles urbains. Les caractéristiques majeures des méthodes NSGA-II sont l'utilisation de la relation de domination de Pareto et le mécanisme qui permet de conserver la diversité pour l'évaluation de la condition d'adaptation avec une sorte d'élitisme (DEB, 2001) (DEB, PRATAP, *et al.*, 2002). En raison de ces caractéristiques, la convergence et la propagation du front de solutions sont assurées, sans avoir besoin d'utiliser une population externe.

4.2. La méthodologie de projet par optimisation

Parmi les types urbains définis précédemment, seulement la classe 4 ou la typologie urbaine « verticale moderne » un seule est davantage étudiée ici grâce à l'évaluation de l'optimisation.

Ici, nous cherchons à optimiser la typologie urbaine mentionnée, basée sur les paramètres majeurs qui la définissent à l'échelle du quartier et de l'ilot. Nous ne sommes pas intéressés par les détails plus ou moins aléatoires de la forme des bâtiments à l'échelle architecturale. Le type urbain ici peut être défini comme un modèle de référence qui met en valeur les principaux traits les plus fréquents d'une forme bâtie à l'échelle urbaine et qui exercera le plus d'influence sur la performance énergétique. Pour simplifier la géométrie des bâtiments, on réduit l'impact de la complexité sur les résultats, ce qui permet d'approfondir la compréhension en ce qui concerne les liens entre les typologies et le potentiel d'énergie solaire (RATTI, RAYDAN e STEEMERS, 2003) (COMPAGNON, 2004) (GRIEGO, KRARTI e HERNANDEZ-GUERRERO, 2012) (COMPAGNON e RAYDAN, 2000). En outre, on sait que dans le processus de conception architecturale, les décisions cruciales sont prises dans les premiers étapes de la conception, lorsque le concepteur a besoin de mettre en place le volume, la proportion, la compacité, l'implantation et l'orientation souvent en appliquant des paramètres de régulation locale urbaine (COS, CES etc..).

4.2.1. La définition des variables de projet

A partir de l'analyse de sensibilité, il a été possible de définir les facteurs morphologiques les plus pertinents sur les phénomènes physiques principaux : l'irradiation et l'éclairement sur l'enveloppe des bâtiments (Tableau 9-11). Dans le processus d'optimisation, pour chacune des variables pertinentes, les plages de valeurs sont considérées en fonction des caractéristiques de la typologie *cas de base* (classe 4) et ses intervalles les plus fréquents (Tableau 12).

4.2.2. Les contraintes du projet urbain

Les contraintes de conception considérées ici sont basées sur des critères morphologiques et environnementaux. Les critères morphologiques sont définis par les paramètres du règlement d'urbanisme de Maceió pour notre typologie *cas de base* (voir Tableau 12). Généralement, ces paramètres sont constitués d'un COS maximale de 4.0, d'un CES de 0.70, d'un DB minimal de 3,0 et d'un NE maximal de 15.

Les contraintes environnementales sont établies en définissant les valeurs de seuil d'éclairement sur les façades, afin d'atteindre un niveau acceptable de lumière du jour à l'intérieur (voir section 2.1). Cela permet la recherche de projets urbains optimaux en termes d'irradiation minimale sur les surfaces verticales de façades, tout en assurant un niveau acceptable de lumière du jour.

4.2.3. Les fonctions objectives

L'optimisation de cette configuration urbaine particulière est évaluée au moyen d'une mesure de l'efficacité qui caractérise la fonction objective. Dans ce travail, nous parlons d'une optimisation multi-objectif définie par:

- Minimiser l'irradiation sur les façades verticales (f_{obj1}) et la maximiser sur les toitures des bâtiments (f_{obj2}), dans le but de réduire les apports solaires par les façades, cause de surchauffe à l'intérieur des bâtiments et en même temps d'améliorer le potentiel de production de l'énergie solaire sur leurs toits.

Trouver $\arg \min f_{obj} = [f_{obj1}, -f_{obj2}]$, soumis aux contraintes suivantes:

$$E_S \geq 9375 \text{ lux}; E_N \geq 11538 \text{ lux}; E_O \geq 10714 \text{ lux} ; E_E \geq 10000 \text{ lux}; CES \leq 0.70; COS \leq 4.0$$

Où:

$E_{S,N,O,E}$ = Illuminance sur les quatre façades: Sud, Nord, Ouest et Est; CES=Coefficient d'Emprise au Sol; COS=Coefficient d'Occupation du Sol.

Dans la suite, l'analyse d'optimisation a été réalisée à l'aide de la méthode NSGA-II. Pour cette analyse d'optimisation, il a été considéré: une population initiale de 50 personnes et 200 générations, une probabilité de croisement de 90 % et une probabilité de mutation de 10%. Les valeurs de ces paramètres ont été choisies en ayant comme base la littérature (MAGNIER e HAGHIGHAT, 2010) (ZITZLER, DEB e THIELER, 2000) (TAN, LEE e KHOR, 2002).

La population initiale a été définie aussi à partir des résultats du plan d'expérience et de l'analyse effectuée dans la section suivante, où certaines configurations faisables sont sélectionnées. Ainsi, la population initiale est composée avec les configurations faisables et choisies aléatoirement par une tentative de couvrir au maximum l'espace de recherche.

Après que les variables d'entrée aient été définies et la méthode de recherche et d'évaluation définie (méthode d'analyse DOE), et l'optimisation sur Modefrontier® (MODEFRONTIER, 2013), les valeurs des variables d'entrée sont écrites dans un fichier d'entrée de Citysim et analysées dans le solveur (code) pour être évaluées dynamiquement. Seuls les projets faisables du point de vue des contraintes du règlement d'urbanisme sont considérés. Les résultats sont ensuite renvoyés à la plateforme Modefrontier®, où les statistiques annuelles des résultats sont effectuées à l'aide de la calculatrice Matlab®. Tous les modèles faisables et infaisables générés par le processus d'optimisation sont analysés en utilisant la boîte à outil statistique du Modefrontier® (MODEFRONTIER, 2013).

4.3. Vers des solutions optimales

4.3.1. Optimisation pour la classe typo-morphologique 4 : la ville verticale

La Figure 14 présente un résumé des simulations exécutées indiquant proportionnellement l'occurrence des configurations faisables et infaisables. Pour les configurations urbaines infaisables, la Figure 15 quantifie proportionnellement les contraintes qui ont été violées. Il est possible de constater que les contraintes les plus critiques sont les paramètres morphologiques, le CES et le COS, imposés par le code d'urbanisme local, suivi par les niveaux d'éclairement sur les façades.

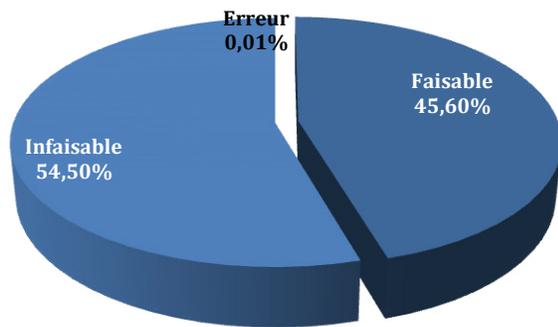


Figure 14: résumé des simulations pour la classe 4.

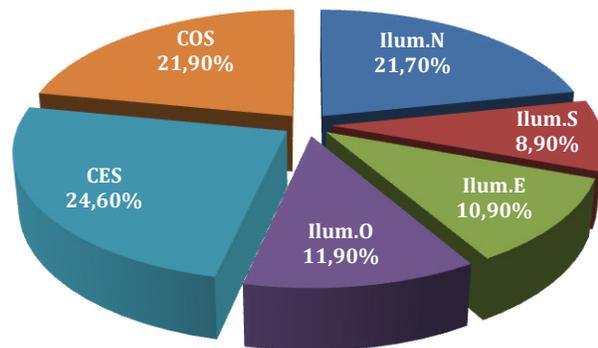


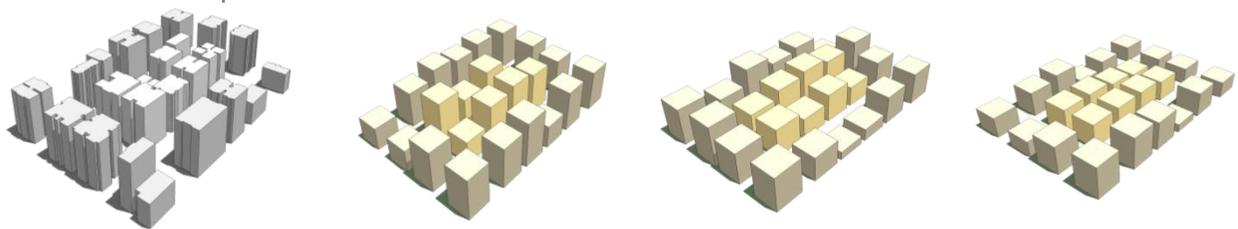
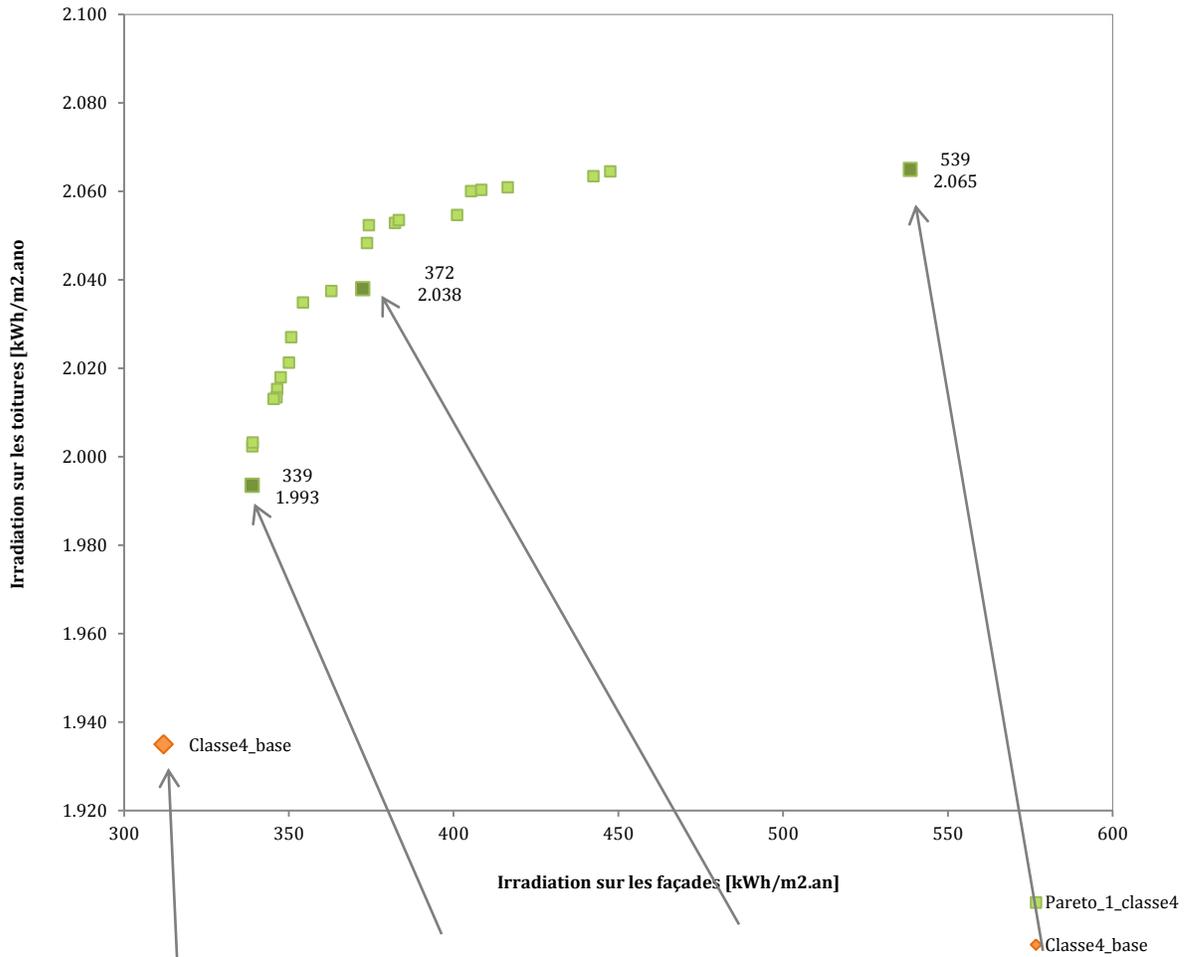
Figure 15: violation des contraintes pour la classe 3.

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 16, où l'ensemble des projets optimaux est représenté par un carré vert. Les configurations urbaines mises en évidence dans les graphiques sont celles appartenant au front de Pareto, les solutions optimales non-dominées. Une grande quantité de solutions de Pareto ont été trouvées entre les deux extrêmes des réponses, comme nous montre le graphique de la Figure 16.

Les résultats indiquent que, pour l'irradiation, un gain d'environ 12 % a été atteint sur les toitures, tandis que pour l'irradiation sur les façades, une réduction d'environ 44 % a été obtenue.

Les solutions optimales vont d'une irradiation annuelle sur les toitures de 1993kWh/m², pour une irradiation annuelle sur les façades de 339 kWh/m²; et une irradiation sur les toitures de 2065 kWh/m², pour une irradiation annuelle sur les façades des 538 kWh/m². Une amélioration des solutions a pu être identifiée, mais aussi un ensemble des paramètres nous ont également indiqué des tendances très importantes qui pourront conduire à établir des indicateurs plus complets pour le développement de la morphologie urbaine dans ces régions. Par exemple, les valeurs optimales pour l'albédo des surfaces verticales, très proches de la limite supérieure de son intervalle de valeurs, semblent être très influents dans la réduction des niveaux d'irradiation sur les façades. Au même temps, imposer un taille limite (avec une limite inférieure et supérieure de 5 et 7 étages, respectivement), en évitant des écarts relatifs important entre les bâtiments, peut induire à un plus grand potentiel de production d'énergie sur leurs surfaces horizontales.

A partir de la Figure 16, il est également possible de visualiser simultanément les configurations optimales du front Pareto avec la typologie *cas de base* (en losange orange). La classe de référence a été classée comme un projet infaisable en raison de son très faible niveau d'éclairage sur les façades. Cela explique aussi son niveau très faible aussi en terme d'irradiation sur les façades par rapport aux cas optimaux. En comparant avec les résultats de compromis optimisés, nous avons trouvé une amélioration de 7 % pour l'irradiation sur les toits, avec une perte de 6 % par rapport à la réduction envisagée d'irradiation sur les façades.

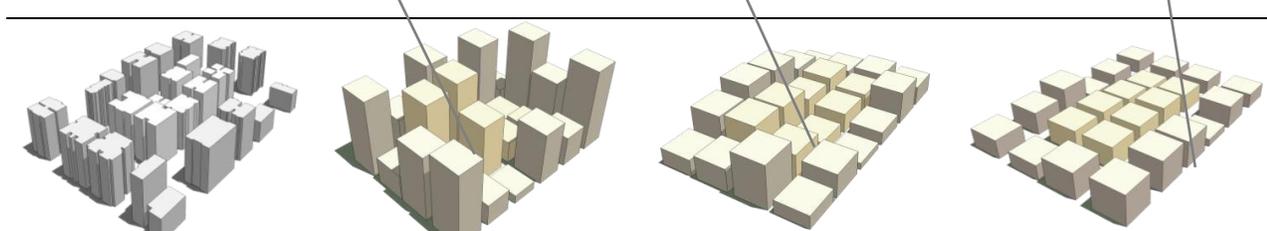
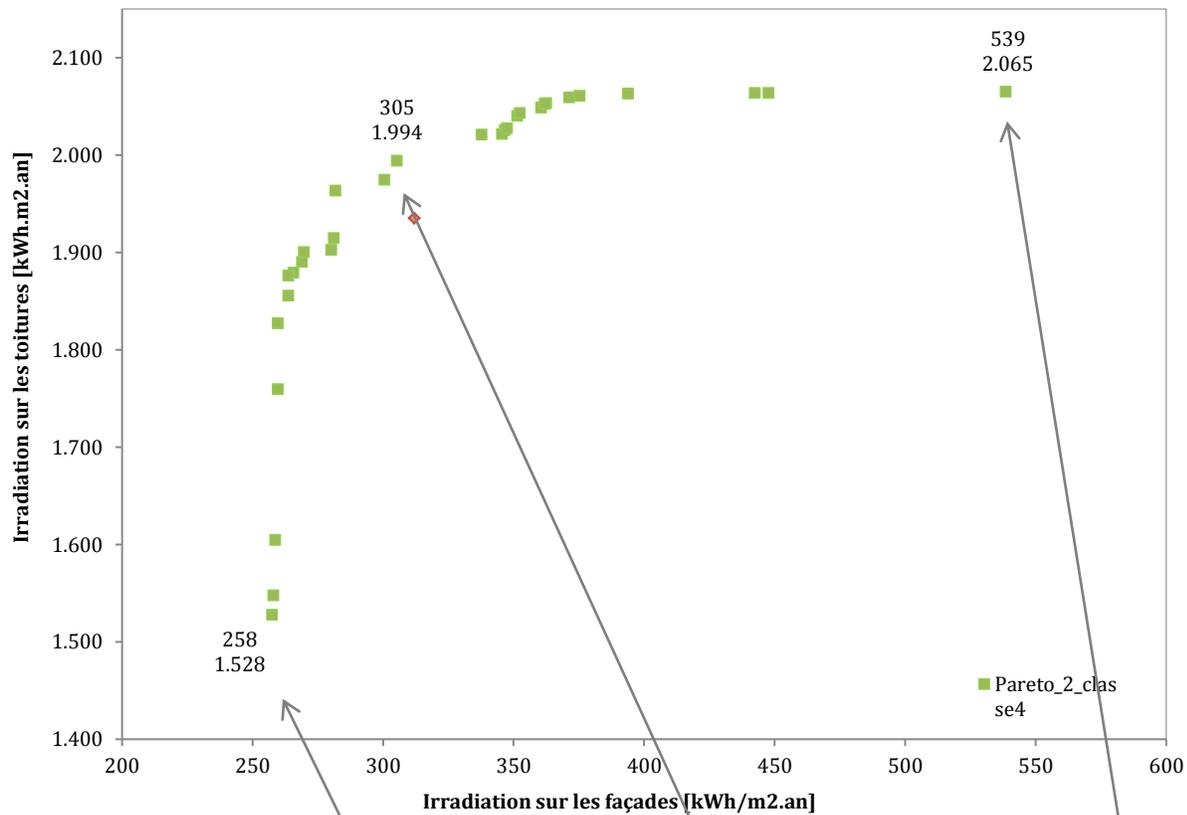


Classe4_base	C4(1)1 Min	C4(1)2	C4(1)3 Max
COS=4,2	COS =4,4	COS=4,2	COS=2,7
CES=0,49	CES =0,63	CES=0,59	CES=0,51
NE=8	NE=7	NE=7	NE=5
ET_hauteur=9	ET_hauteur =7,3	ET_hauteur =7,8	ET_hauteur =5
Prospect=3,3	Prospect=2,5	Prospect=2,4	Prospect=1,3
Albédo toiture=0,20	Albédo toiture =0,26	Albédo toiture =0,36	Albédo toiture =0,26
Albédo toiture =0,20	Albédo toiture =0,49	Albédo toiture =0,49	Albédo toiture =0,49

Figure 16: résultats du premier processus d'optimisation.

Tout en assurant le même seuil de lumière du jour intérieur, nous avons tenté d'élargir les possibilités de configurations urbaines en modifiant les paramètres de densité imposée par le code urbain local, sur une deuxième optimisation (Figure 17 et Tableau 12). Les configurations pouvant être deux fois plus denses (COS de 8.1), tout en respectant le seuil du CES (de 0,7) et NE (de 11), ont

présenté une réduction de 24 % sur le rayonnement solaire sur les façades, avec également une importante réduction de 27 % de l'énergie solaire potentielle sur les toitures. Ce résultat pourrait être aussi considéré comme une stratégie urbaine pour la réduction des gains de chaleur de source solaire dans les bâtiments, notamment dans les quartiers où la production d'énergie solaire peut être plus contraignante du point de vue budgétaire. Et pour un environnement urbain un peu moins dense (COS de 4,5 et CES de 0,6), nous avons trouvé un meilleur compromis, avec une réduction de 11 % du rayonnement sur les façades et seulement 1 % de réduction sur les toitures.



Classe4_base	C4(2)1 Min	C4(2)2	C4(2)3 Max
COS=4,2	COS =8,1	COS =5,8	COS =3,06
CES=0,49	CES =0,73	CES =0,76	CES =0,58
NE=8	NE=11	NE=8	NE=5
ET_hauteur=9	ET_hauteur =19	ET_hauteur =10	ET_hauteur =5
Prospect=3,3	Prospect=6,6	Prospect=4,5	Prospect=1,32
Albédo toiture=0,20	Albédo toiture =0,47	Albédo toiture =0,48	Albédo toiture =0,26
Albédo vertical=0,20	Albédo vertical=0,50	Albédo vertical=0,50	Albédo vertical=0,49

Figure 17: résultats de la deuxième optimisation.

Les résultats ont indiqué le rôle crucial de l'ensemble des facteurs de densité considérés, qui pourrait être revus par le décideur urbain local, favorisant des potentialités environnementales et des retombées économiques importantes dans ces domaines. Le Tableau 12 ci-dessous résume la gamme des valeurs obtenues par les variables optimales.

Tableau 12: les valeurs limites de projet, les contraintes urbaines, le cas de base et les paramètres de projet optimaux.

Facteurs	Interval les de valeurs	Cas de base	Contraintes de projet		Solutions optimales (1 st)		Solutions optimales (2 nd)	
			Min	Max	Max	Max	Min	Max
Albédo toiture	0,05;0,5	0,2	-	-	0,26	0,26	0,47	0,26
Albédo façades	0,05;0,5	0,2	-	-	0,49	0,49	0,50	0,49
Epaisseur (m)	8;40	15	-	-	22,0	18,0	20,0	24,0
Largeur (m)	8;40	15	-	-	16,0	18,0	16,0	22,0
Hauteur (m)	6;45	30	-	-	22,0	16,0	33,0	16,0
BS (m)	1,5;3,0	3,0	1,5	3,0	6,0;2,0	6,0;6,0	6,0;1,0	6,0;6,0
Rue largeur (m)	9;15	9,0	9,0	-	9,0	12,0	5,0	12,0
NE	2;15	8	10	15	7	5	11	5
COS	2,0;4,0	4,2	-	4,0 (4,5)	4,4	2,7	8,1	3,06
CES	0,35;0,7	0,49	0,50	0,70	0,63	0,51	0,73	0,58
Compacité	0,05;5,0	0,30	-	-	0,26	0,29	0,26	0,24
PM	0,5;10	3,3	-	-	2,5	1,3	6,6	1,32
Surface construite (toiture) moyenne	-	225	-	-	352	324	320	528
Surface moyenne d'enveloppe	-	1800	-	-	2043	1467	2696	1988
Irrad. solaire toitures (kWh/m ² .an)	-	1935			1993	2065	1528	2065
Irrad. solaire façades (kWh/m ² .an)		312			339	538	258	539
Irrad. IR façades (kWh/m ² .an)		5,0			12,4	-1,0	69,9	-2,0
Irrad. IR toitures (kWh/m ² .an)		-54,7			-41,3	-80,3	-38,3	-86,1
Illuminance façades oest (Lux)		1.925			11.078	16.197	12.354	16.197
Illuminance façades nord (Lux)		2.002			12.491	14.942	10.519	14.943
Illuminance façades est (Lux)		1.955			11.444	13.498	12.247	13.498
Illuminance façades sud (Lux)		1.855			10.006	15.679	10.035	15.680

Le graphique de la Figure 18 présente les deux fronts de Pareto, avec et sans l'imposition des contraintes du code local d'urbanisme. Nous vérifions une légère amélioration de la performance globale des projets optimaux dans le processus d'optimisation, pour lesquels les contraintes du code local ont été imposées ainsi qu'une meilleure distribution des solutions d'un extrême à l'autre du front. Avec la possibilité d'augmenter librement la densité construite et la verticalité (sans les contraintes du code d'urbanisme), il est devenu possible de trouver des solutions avec des prospect plus importants, de plus grande diversité de hauteur et, par conséquence, une plus faible incidence solaire directe sur les surfaces. Donc, nous mettons en évidence encore une fois, l'impact prépondérant du prospect moyen sur la performance radiative des surfaces (toitures et façades).

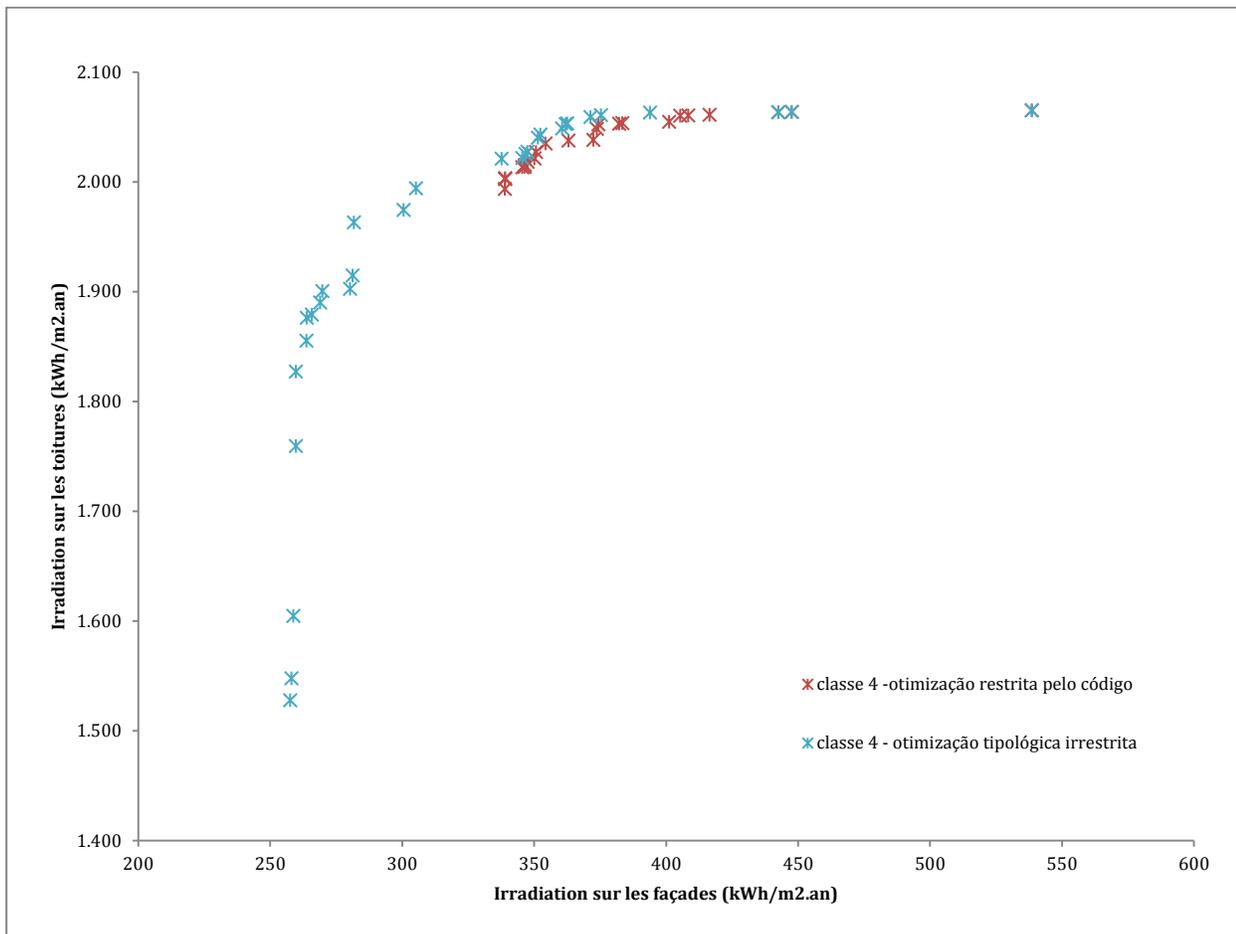


Figure 18 : projets du front de Pareto pour les deux scenarios d'optimisation multi objective pour la classe 4.

4.1.1. Optimisation de la classe typo-morphologique 3: la ville compacte

La Figure 19 présente un résumé des simulations réalisées indiquant proportionnellement l'occurrence des configurations faisables et infaisables. Pour les configurations urbaines infaisables, la Figure 20 quantifie proportionnellement les contraintes qui ont été violées. Il est possible de constater que les contraintes les plus critiques ont été, cette fois-ci, les paramètres physiques correspondants au niveau d'illuminance pour tout orientation, contrairement à ce que nous avons vu pour la classe 4. Ce résultat peut être expliqué par les caractéristiques typologiques de la classe 3. L'inexistence d'espace entre les bâtiments voisins fait que la faisabilité de ces projets semble plus contraignante dans la recherche de solutions qui présentent les niveaux minima d'éclairément.

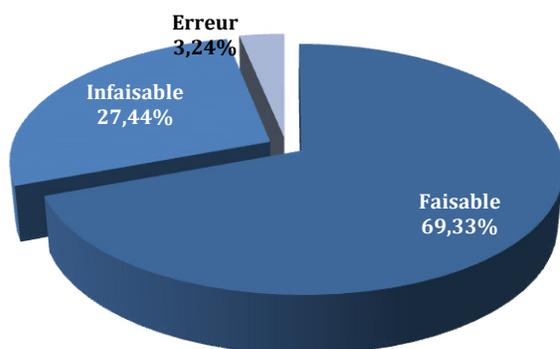


Figure 19: résumé des simulations pour la classe 3.

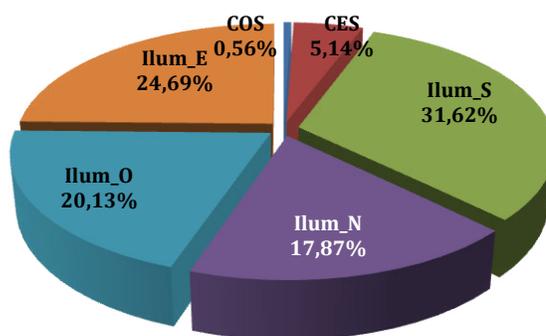


Figure 20: violation des contraintes pour les simulations de la classe 3.

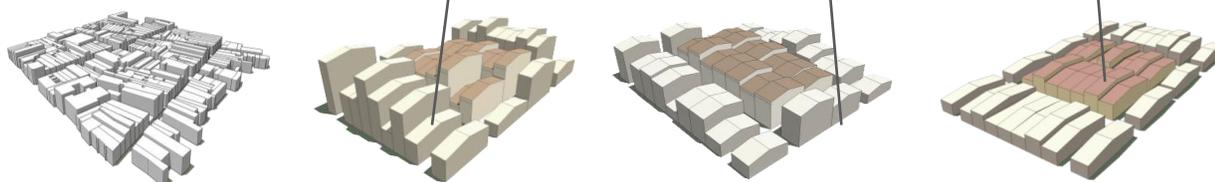
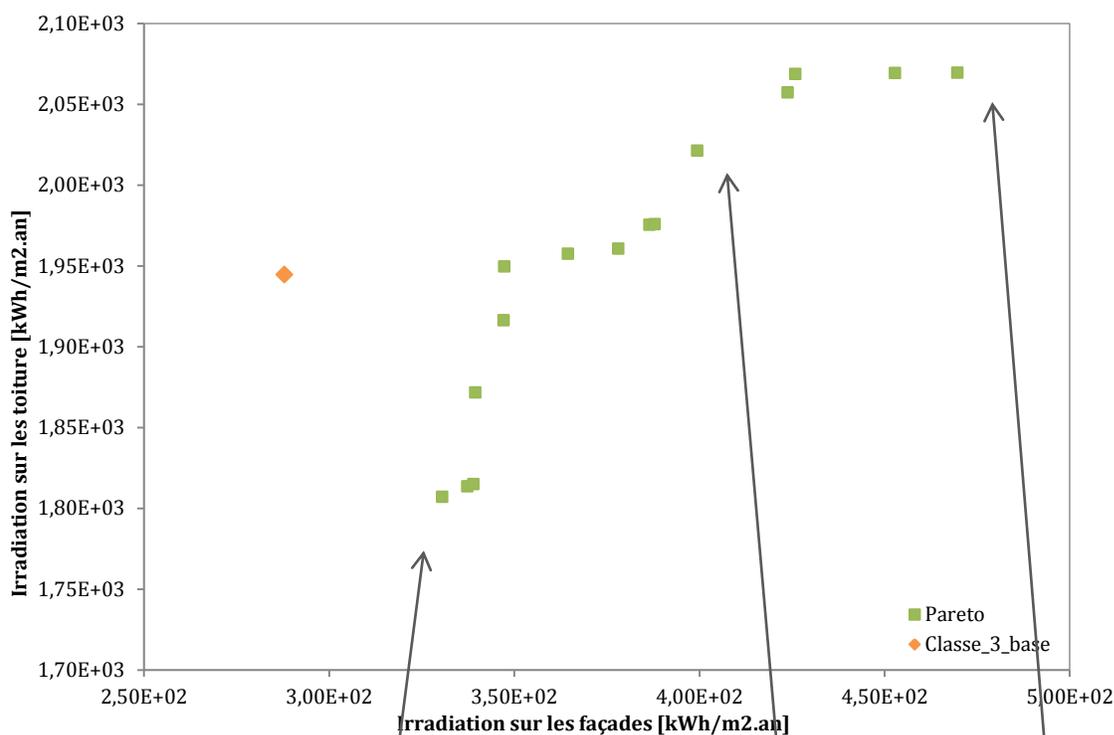
Les solutions optimales ont variées d'un extrême du Pareto (Min) avec une irradiation pour les toitures de 1810 kWh/m².an, pour une irradiation annuelle sur les façades de 331 kWh/ m².an; à l'autre extrême (Max) avec une irradiation sur les toitures de 2070 kWh/ m².an, pour une irradiation annuelle sur les façades des 470 kWh/ m².an (Figure 21).

Pour les résultats de cette optimisation multi objective, nous avons un gain de 6% pour le niveau d'irradiation sur les toits et une perte de 13% en terme de réduction du rayonnement solaire sur les façades, par rapport au cas de base (classe 3). Cependant, un gain très important en terme d'éclairage.

Parmi les projets trouvés dans les extrêmes du front de Pareto, une importante variabilité de l'écart type de la hauteur moyenne construite a été mise en évidence. Cette variabilité a permis la génération de formes qui peuvent représenter des typologies très diversifiées, en fonction des objectifs et des poids qui peuvent être attribués. Plus faible est l'écart de la hauteur, plus forte est le potentiel d'approvisionnement de l'énergie solaire. Les projets intermédiaires du front sont les plus hétérogènes, en terme de hauteur construite (Figure 18), en présentant en moyenne un excellent potentiel solaire (seulement 4% de moins par rapport à la solution appartenant à l'extrême maximale du Pareto), pour en gain de 17% en terme de réduction du rayonnement solaire sur les façades verticaux. Une solution intermédiaire est illustrée dans la Figure 21 (le projet c3(1)2).

Si nous comparons cette solution de compromis (intermédiaire) avec le cas de base de la classe 3, nous pouvons identifier une perte de 26% en terme de réduction de l'irradiation sur les façades. La classe 3 à l'origine serait plus efficace sur la minimisation des apports solaires non-souhaitables pour ce contexte climatique et représenterait un potentiel solaire de seulement 2% plus faible, par rapport au projet optimal intermédiaire. Cependant, comme nous le savons, le cas base de la classe 3 présente un niveau moyen d'éclairage insuffisant, par rapport aux valeurs minima établies dans la littérature, ce qui rend le projet infaisable, ce que démontre le graphique de la figure 18.

La difficulté plus importante trouvée dans le projet de cette classe typologique concerne sa mittoyenneté, puisque cela peut imposer (comme nous pouvons vérifier par la performance obtenue pour le cas base) une grande réduction de l'incidence solaire moyenne sur les façades et une réduction drastique en termes d'illuminance. Afin de ne pas violer les contraintes d'illuminance imposées pour les façades, les solutions trouvées ont une variation stratégique en terme de hauteur construite et un prospect plus faible. Cet écart entre les hauteurs rend possible le fait que les bâtiments aient toujours une fraction minimale de toutes leurs façades exposées à l'extérieur.



Classe3_base	C3(1)1 Min	C3(1)2	C3(1)3 Max
COS=2,4	COS=2,3	COS=2,1	COS=1,0
CES=0,75	CES =0,74	CES =0,76	CES =0,80
NE=3	NE=3	NE=2	NE=1
ET_hauteur=1,0	ET_hauteur =3,1	ET_hauteur =3,1	ET_hauteur =1,0
Prospect=1,2	Prospecto=2,9	Prospecto=1,6	Prospecto=1,3
Albédo toiture=0,15	Albédo toiture =0,20	Albédo toiture =0,21	Albédo toiture =0,2
Albédo vertical=0,15	Albédo vertical=0,45	Albédo vertical=0,24	Albédo vertical=0,2

Figure 21: résultats de l'optimisation multi objective restreinte par les paramètres du code local. Source: illustration de l'auteur.

Avec des bâtiments plus bas et un prospect de 1.3, l'ilot urbain qui permet de maximiser le potentiel solaire (C3 (1) Max), par exemple, possède une plus faible influence des ombres portées sur les bâtiments avoisinants et, leurs façades reçoivent, par conséquence, une plus grande incidence solaire. L'écart type de la hauteur de 1m (Figure 22) permet que l'illuminance moyenne de l'ilot soit assurée. Étant donné cet ensemble de caractéristiques morphologiques que génèrent une typologie avec une plus forte compacité, c'est-à-dire, une plus grande surface d'enveloppe extérieure par rapport au volume bâti ($C_m=0,9$), un albédo élevé pourrait produire un excès de réflexion sur les surfaces verticales, en augmentant leur irradiation. Ainsi, pour cette solution, l'albédo trouvé a été le plus faible entre les projets optimaux du front.

Pour le scénario où il est possible d'atteindre une meilleure performance pour les façades (C3 (1) Min), la moyenne de la hauteur atteint la limite supérieure de l'intervalle établi pour cette typologie. Ainsi, l'augmentation du prospect moyen a permis d'augmenter l'obstruction à l'incidence

solaire directe dans les surfaces verticales, en réduisant leur irradiation. Avec un écart type plus important de la hauteur moyenne et un albédo maximum pour les surfaces verticales, l'illuminance moyenne de l'îlot a été assurée aux niveaux minima imposés comme contrainte. Néanmoins, de par l'augmentation importante de l'écart de la hauteur (ET_hauteur), nous pouvons également noter une réduction de l'irradiation moyenne sur les toitures, due à la proximité et aux ombres portées par les bâtiments voisins. Toutefois, le niveau d'irradiation sur les toitures pour cette solution de compromis (1890 kWh/m².an) peut être assez satisfaisant, vues les valeurs minimales recommandées dans la littérature.

Nous rappelons que ces solutions ont été trouvées après la convergence de l'algorithme pour un certain nombre d'itérations limité. Les projets dit optimaux sont donc optimaux dans le contexte méthodologique déterminé par cette étude.

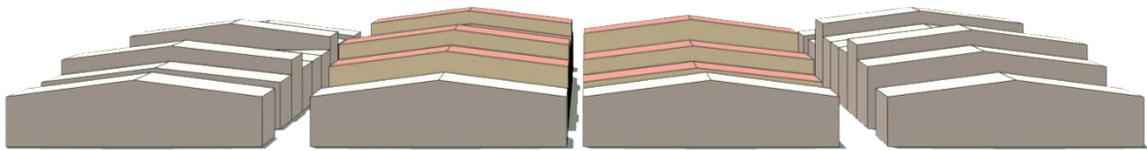


Figure 22: vue de la typologie *C3(1)Max* générée par le processus d'optimisation, en démontrant la variation obtenue pour la hauteur moyenne. Source: illustration de l'auteur.

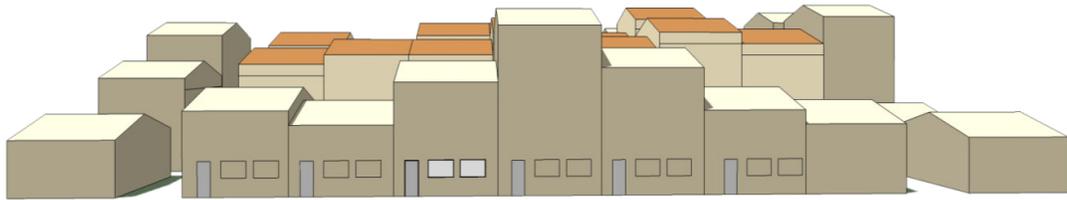


Figure 23: vue de la typologie *C3(1)* générée par le processus d'optimisation, en démontrant la variation obtenue pour la hauteur moyenne des bâtiments. Source: illustration de l'auteur.

A l'instar de la classe 4, une deuxième série de simulations a été mis en place pour la classe 3, afin d'observer l'impact des contraintes morphologiques imposées par le code d'urbanisme.

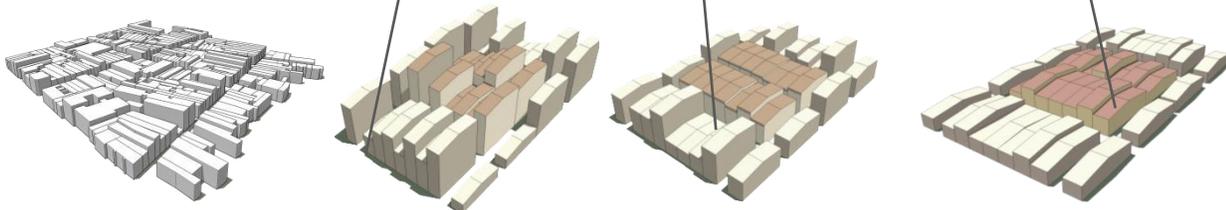
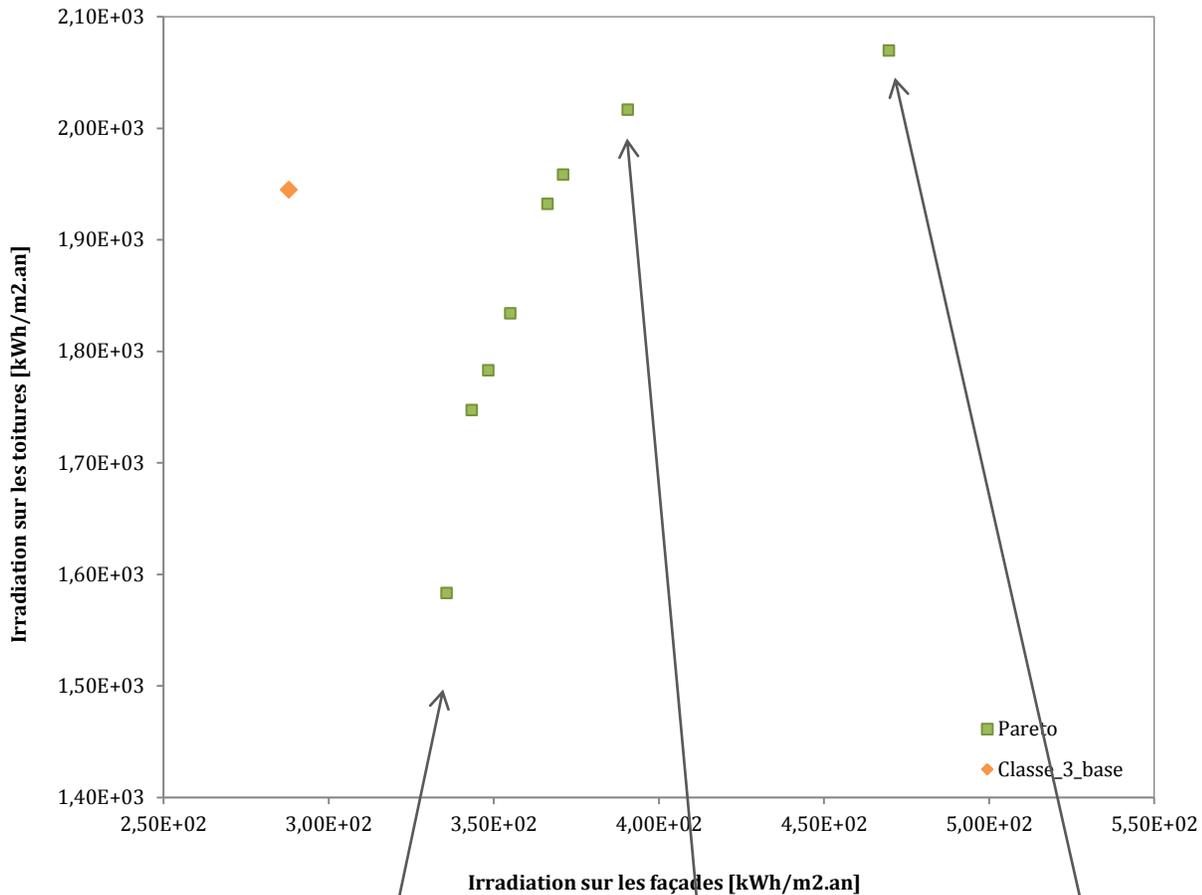
Les solutions optimales ont variées d'un extrême du Pareto (Min) avec une irradiation pour les toitures de 1580 kWh/m².an, pour une irradiation annuelle sur les façades de 336 kWh/ m².an; à l'autre extrême (Max) avec une irradiation sur les toitures de 2070 kWh/ m².an, pour une irradiation annuelle sur les façades des 470 kWh/ m².an (Figure).

Dans la deuxième série de simulations correspondant aux mêmes objectifs, la même solution qui maximise le potentiel solaire a été trouvée. Et le projet à l'autre extrême a présenté à son tour, une performance inférieure.

Les mêmes observations que pour la simulation précédente peuvent être faites. Une importante variabilité dans la hauteur moyenne a permis la génération de formes qui peuvent représenter des typologies beaucoup plus diversifiées, en fonction des objectifs et des poids qui peuvent y être attribués.

Les projets intermédiaires sont, cependant, plus efficaces que ceux qui ont été identifiés lors de la première simulation de la classe 3, avec une perte de seulement 2% par rapport au meilleur projet (extrême max) en terme de potentiel solaire sur les toits et un gain très important de 17% en terme de réduction de l'apport solaire sur les façades.

Si nous comparons cette solution de compromis avec le cas de base, nous allons vérifier une perte de 26% en termes de réduction de l'apport solaire sur les façades, mais nous rappelons que le projet original présente aussi un niveau insuffisant d'éclairage naturel par rapport aux seuils établis dans la littérature, ce qui l'amène à être considéré comme un projet infaisable (Figure 24).



Classe3_base	C3(2)1 Min	C3(2)2	C3(2)3 Max
COS=2,4	COS=2,5	COS=2,8	COS=1,0
CES=0,75	CES=0,74	CES=0,75	CES=0,80
NE=3	NE=3	NE=4	NE=1
ET_hauteur=1,0	ET_hauteur=4,5	ET_hauteur=3,2	ET_hauteur=1,0
Prospect=1,2	Prospect=2,9	Prospect=1,9	Prospect=1,3
Albédo toiture=0,15	Albédo toiture=0,2	Albédo toiture=0,40	Albédo toiture=0,2
Albédo vertical=0,15	Albédo vertical=0,46	Albédo vertical=0,31	Albédo vertical=0,2

Figure 24: résultats de l'optimisation multi objective sans les contraintes du code local. Source: illustration de l'auteur.

La Figure ci-après superpose les deux fronts de Pareto trouvés pour la classe 3 (avec et sans les contraintes imposées par le code local d'urbansime). Nous vérifions que les deux fronts se sont

interceptés, mais que les projets qui minimisent l'apport solaire sur les façades sont supérieurs pour la première simulation (celles avec les contraintes du code). Nous observons que les contraintes du code local ont exercé un impact moins important sur les résultats que pour la classe 4.

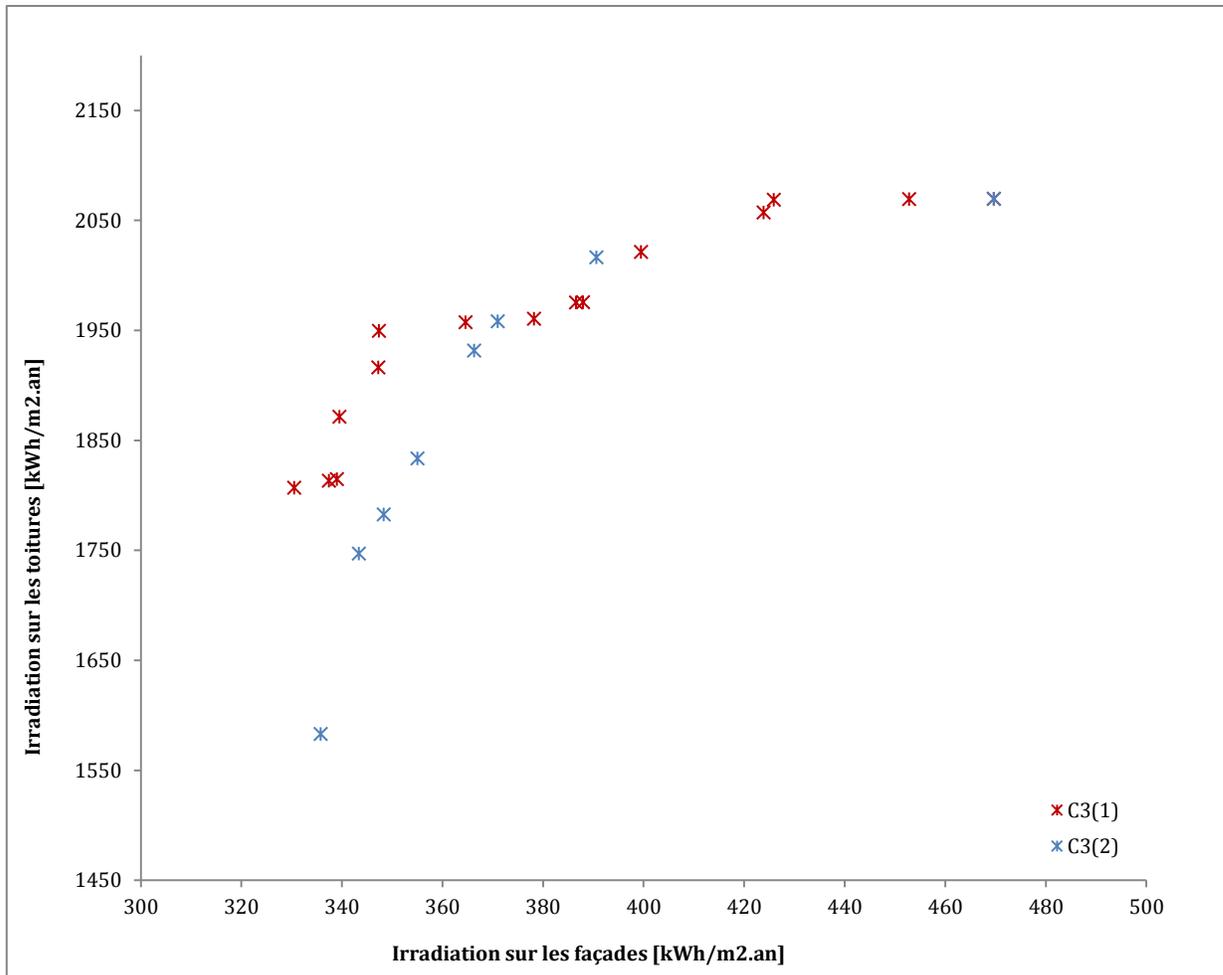


Figure 25: projets des fronts de Pareto pour les deux tours de simulations réalisées pour la classe 3.

Le tableau ci-après fait une synthèse des données, intervalles et résultats des deux séries de simulations pour la classe 3 (Tableau 13).

Nous observons encore que les valeurs présentées pour les facteurs typo-morphologiques peuvent être très proches, comme c'est le cas des deux projets de l'extrême minimale (*C3(1)Min* et *C3(2)Min*), mais en présentant des performances qui sont différentes. Dans ce sens, nous mettons en avant la performance pour le potentiel solaire des toitures. Cette différence peut être attribuée à la variabilité dans l'implantation des bâtiments et de leurs respectives hauteurs bâties. Autrement dit, les îlots peuvent avoir la même moyenne de hauteur, par exemple, mais correspondre à un placement différent des bâtiments, en générant des résultats différents.

En ce sens, il est possible d'affirmer que la magnitude d'impact dans la variabilité de la hauteur des bâtiments (ET_hauteur) annoncée précédemment, doit être aussi associée à la variabilité de l'implantation des bâtiments dans les îlots et dans la maille urbaine.

Cette constatation peut amener à des projets urbains davantage spécifiques et à une échelle plus petite par rapport à ceux trouvés actuellement dans le code d'urbanisme local. Le code actuel part d'un macro zoning urbain classique basé sur la séparation de fonctions et de typologies. Ces discussions seront reprises dans la suite des discussions des résultats.

Tableau 13: résumé des intervalles, contraintes et valeurs trouvées pour les configurations, original et optimisées, pour la classe 3.

Facteurs	Intervalles de valeurs	Cas de base	Contraintes de projet		Solutions optimales (1 st) classe 3		Solutions optimales (2 nd) classe 3	
			Min	Max	Max	Max	Min	Max
Albédo toiture			-	-	0,2	0,2	0,2	0,2
Albédo façades			-	-	0,45	0,2	0,46	0,2
Epaisseur (m)			-	-	16	16	16	16
Largeur (m)			-	-	4	4	4	4
Hauteur (m)			-	-	11	4	11	4
BS (m)					0;1	0;1	0;1	0;1
Rue largeur (m)			-	-	4	3	3,7	3
NE					4	1	4	1
COS					2,7	1	2,5	1
CES					0,74	0,8	0,74	0,8
Compacité			-	-	0,7	0,9	0,73	0,96
PM			-	-	2,9	1,3	2,9	1,3
Surface construite (toiture) moyenne			-	-	64	64	64	64
Surface moyenne d'enveloppe			-	-	496	216	462	184
Irrad. solaire toitures (kWh/m ² .an)	-	1940,7	-	-	1806	2070	1583	2070
Irrad. solarie façades (kWh/m ² .an)	-	287,9	-	-	331	470	336	470
Irrad. IR façades (kWh/m ² .an)	-	-54,7	-	-	-37,2	-92,4	-40,5	-92,4
Irrad. IR toitures (kWh/m ² .an)	-	5,0	-	-	22,4	-2,9	60	-2,9
Illuminance façades ouest (Lux)		7.609	-	-	10.131	17.356	10.208	17.356
Illuminance façades nord (Lux)		7.602	-	-	10.119	14.124	12.096	14.124
Illuminance façades est (Lux)		7.812	-	-	10.359	15.956	10.006	15.956
Illuminance façades sud (Lux)		7.805	-	-	10.319	12.458	10.288	12.458

5. UNE ANALYSE PROSPECTIVE POUR MACEIO

Dans cette dernière étape nous cherchons à passer des contraintes solaires aux opportunités de projet urbain, en croissant les résultats issus de l'optimisation avec d'autres thématiques importantes à la problématique urbaine des villes comme Maceió. Par exemple, pour aboutir à un compromis entre les critères énergétiques imposés au processus de projet, les résultats obtenus ont exprimé une certaine variabilité formelle (principalement en terme de densité bâtie), comme nous avons pu le voir entre les deux extrêmes de notre front de solutions. Cette variabilité morphologique peut être croisée avec des concepts tels que la diversité (ou la mixité urbaine), l'accessibilité et l'adaptabilité.

5.1. Contribution à l'approche interdisciplinaire de l'énergie urbaine

5.1.1. *Implantation d'un micro réseau local de production et distribution d'énergie de source solaire*

Du point de vue énergétique, si nous imaginons les ilots urbains proposés comme dotés de systèmes photovoltaïques de production d'électricité (tel que des « ilots solaires »), toutes les solutions non-dominées proposées pourraient également être considérées de façon intégrée, en générant des unités de voisinage avec des densités et fonctions énergétiques distinctes (différents niveaux d'offre et de demande) (Figure 26).

Les projets d'îlot urbain obtenus qui présentent un plus grand potentiel d'exploitation de l'énergie solaire par leurs toitures, en plus de répondre à toute ou à une partie de sa propre demande d'énergie, ils pourraient aussi fonctionner de manière associée aux bâtiments des autres ilots qui présentent un potentiel plus réduit et une plus grande demande potentielle (étant donné leurs plus grande densité construite) en établissant des micros réseaux énergétiques complémentaires.

Une fois associés, les différents niveaux d'offre et de demande énergétique, à l'intérieur des ilots et entre eux (intra et inter îlot), il serait possible d'imaginer des unités de voisinage avec une relative autonomie énergétique. Cela pourrait être possible à travers la possibilité de création d'un micro réseau de production et de distribution d'énergie locale, dans le but de l'insertion de l'énergie renouvelable et de production décentralisée, pouvant être reliée de façon intermittente au réseau électrique conventionnel des villes. A Maceió, une telle proposition pourrait réduire l'effet de pointe de consommation du réseau électrique. Nous rappelons que dans des villes comme Maceió (de basse latitude), le pic de consommation des équipements extrêmement énergivores (ex. les climatiseurs) – compte tenu de certaines typologies d'usage, comme les bâtiments tertiaires – peut correspondre au pic de production d'énergie solaire.

Pour illustrer cette proposition, le schéma d'un projet a été élaboré. Certains ilots urbains proposés dans notre étude pourraient être implantés et hiérarchisés en fonction de leurs densités et de leurs hétérogénéités. De manière à ce que les ombres portées par les ilots les plus verticaux (de potentiel solaire plus faible) ne réduisent pas l'efficacité des ilots plus horizontaux (de plus grand potentiel), aux heures où la hauteur solaire est la plus faible. En outre, cet exemple d'arrangement urbain pourrait aussi être associé à une logique de réseau de transport, comme montre la Figure 26. Ainsi, les ilots de plus forte densité et compacité, mais de potentiel solaire plus faible pourraient être placés proches des axes structurantes de transport collectif, rendant plus facile l'accès par un plus grand nombre d'habitants, en réduisant l'empreinte écologique.

Les ilots tels qu'indiqués sur l'extrême maximal du front de Pareto des Figure 16 et Figure 21, seraient, donc, les plus grands producteurs potentiels d'énergie via soleil. En étant des ilots de plus faible densité, l'offre pourrait être ainsi liée à la demande des bâtiments des autres ilots de plus faible potentiel et de plus forte demande et, ainsi, successivement, en composant un micro réseau intra et inter ilots.

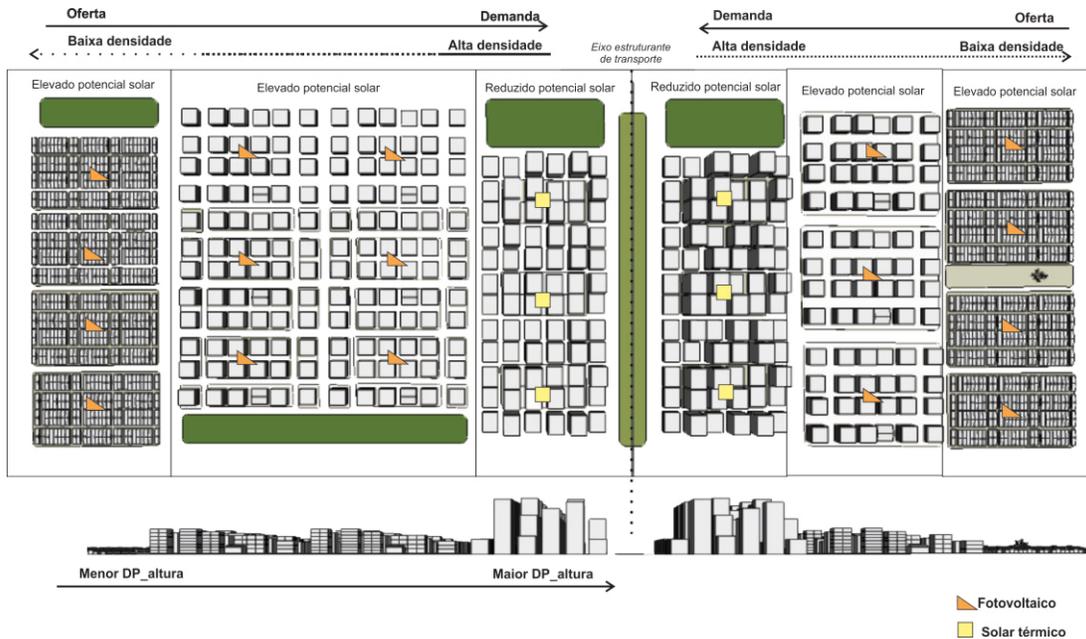


Figure 26: exemple de projet de voisinage a partir des ilots solaires proposés en associant les différents potentiels d'offre et demande.

La Figure 27 ci-dessous compare le potentiel de production d'énergie solaire et de réduction des apports solaires sur les façades pour certains projets obtenus à partir du processus d'optimisation et que sont intégrés dans les schéma de la figure précédente.

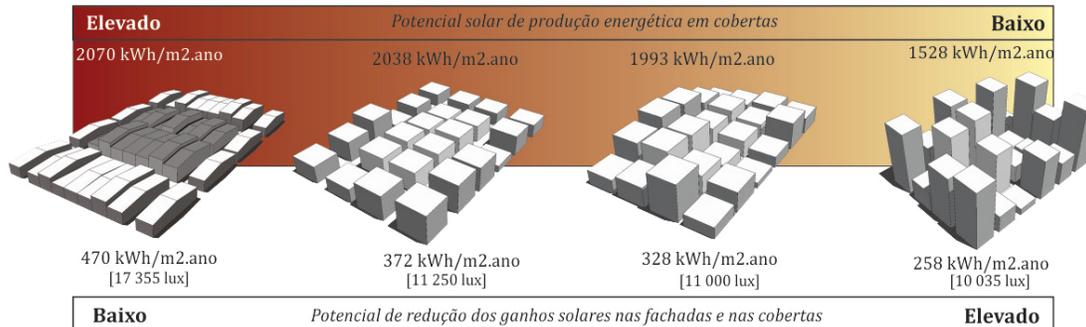


Figure 27: comparaison entre projets de plus fort et plus faible potentiel d'offre d'énergie solaire et de réduction des apports solaire.

5.1.2. La proposition d'ilots mixtes et multifonctionnels

D'après les résultats obtenus, un large répertoire de possibilités formelles entre les deux extrêmes du Pareto a pu être proposé.

Cette variabilité de la forme bâtie, notamment en terme de verticalité et d'occupation du sol, peut permettre de constituer des solutions urbaines très diversifiées aussi dans d'autres aspects : diversité de l'usage et d'occupation du sol, du paysage construit et de l'occupation par différentes classes sociales.

D'un extrême à l'autre du front de Pareto, ces solutions suggèrent des ilots urbains très contrastés et parmi les projets intermédiaires, une plus forte complexité. Cette complexité est traduite dans ce travail en tant qu'opportunité de diversité intra et inter ilot, avec l'implantation de l'habitat collectif (les tours verticales hautes), à côté de logements sociaux à quatre étages et de bâtiments d'un à trois étages avec du commerce, ou encore de l'habitat individuel, de manière à introduire diversité, proximité et connectivité (Figure 28).

Le mixité ou la diversité urbaine consiste à la répartition équilibrée de différentes fonctions

urbaines à l'intérieur d'une structure donnée, compte tenu des facteurs sociaux et économiques (ex. logement social, particulier, activités économiques, commerce, services, etc.) au détriment de la «spécialisation urbaine» ou du zoning urbain classique à l'échelle de l'agglomération ou de la ville. Cette répartition plus équilibrée raccourcit les distances parcourues par les habitants pour répondre à leurs besoins quotidiens et leurs activités plus récurrentes, en évitant des flux de transport unidirectionnel créé par les espaces monofonctionnels (toujours prévus dans beaucoup de codes d'urbanisme).

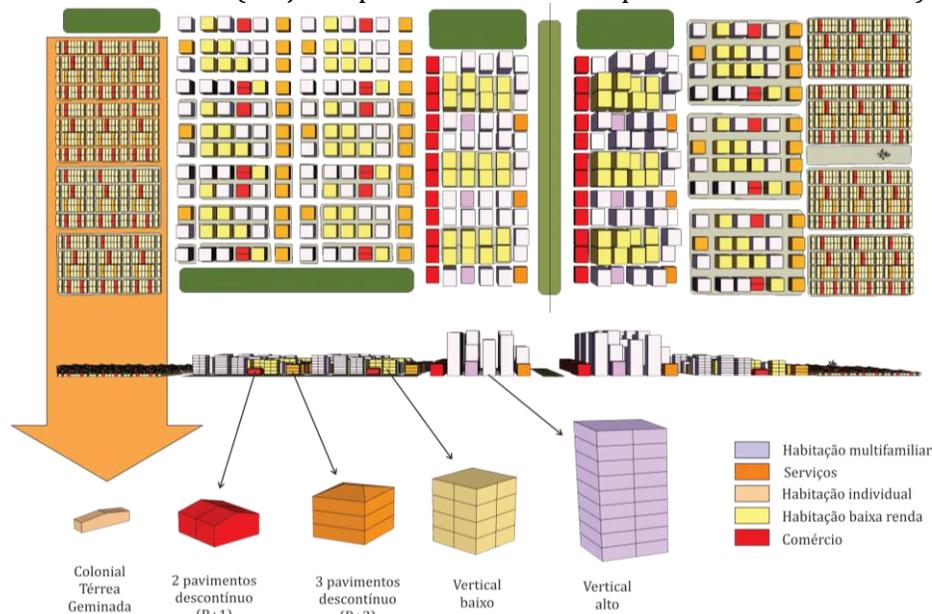


Figure 28: proposition d'intégration du mixité urbain d'usage et occupation du sol à des différentes formes d'ilot urbain obtenues.

En outre, la densité doit être adaptée au contexte dans lequel elle a été établie : plus que la densité elle-même, c'est surtout le contraste entre les différentes densités – la granulométrie des densités (MAUGARD, 2007), qui va définir la ville. Des études menées par Salat (2011) et Arantes (2012) suggèrent également que la variété typologique contribuerait à l'acceptabilité de la densité, autrement dit, à la création des « lieux d'intensité ».

La diversification des formes urbaines peut aussi contribuer à « augmenter l'efficacité globale des villes, (ou au moins des quartiers/districts) et à réduire l'impact sur l'environnement » (ROGERS, 2000). Associée à la présence de paysages naturels, l'exploration et l'intégration de nouvelles technologies à l'échelle du voisinage (tel que l'utilisation de systèmes photovoltaïques pour la production d'électricité à partir du solaire), le mixité de formes urbaines et la granulométrie de la densité seraient une manière de compenser les inconvénients de certaines typologies, pour atteindre une performance acceptable à une échelle plus large.

A partir des discussions et répercussions obtenues avec les résultats de ce travail de recherche, nous pensons que :

- Il peut exister une compatibilité de la diversité formelle trouvée dans l'étude d'optimisation, avec la diversité ou la complexité existante actuellement dans beaucoup de quartiers de villes brésiliennes. Dans le cas de Maceió, malgré la prédominance de certaines caractéristiques morphologiques dans ses quartiers (comme identifié au début de cette étude), il existe encore une complexité, à une échelle plus fine, et des contrastes importants liés à la forme construite mis en évidence, spécialement, dans les quartiers qui subissent des modifications plus intenses et plus rapides, comme dans la plaine maritime de la ville. Néanmoins, la complexité suggérée par la présente étude est programmée.
- Il est possible de proposer un ensemble d'autres nouveaux indicateurs qui puissent être intégrés dans l'approche, afin de tenir compte de la complexité de la forme à l'échelle de l'ilot ou de l'unité de voisinage, ainsi que la dynamique comme opportunité de nouvelles exigences. Ces indicateurs devraient tenir

compte de l'hétérogénéité de la hauteur construite (comme à travers l'écart type de la hauteur) et d'indicateurs plus qualitatifs qui puissent aider à l'aménagement des espaces, tel que l'accessibilité, la diversité, la disponibilité et l'évolution.

- Dotée d'un assez ample répertoire de dispositifs urbains variés, en terme de coefficient d'emprise, d'occupation, de gabarit, de prospects définis par parcelle, l'îlot solaire peut constituer l'élément ou le type de base du tissu urbain, pour les projets de renouvellement ponctuel. En outre, entre les projets variés prescrits à partir de critères énergétiques, il n'y a aucune solution architecturale spécifique. Dans le schéma global des projets proposés, en terme de densité et de diversité, les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage ont une certaine liberté de conception pour ces bâtiments.

5.2. Aide à la décision urbaine

5.2.1. Proposition d'inclusion des nouveaux indicateurs de la forme urbaine dans le système

La forme et la densité des villes ne sont pas uniquement liées aux relations ou mesures physiques, tel que employées dans cette étude (ex. COS, CES, Verticalité, etc.). La densité urbaine est également définie par des éléments qualitatifs et perceptifs, typiques de contextes urbains, moins présentes dans les critères physiques examinés (ex. potentiel solaire, illumination), mais probablement aussi importantes dans la perception par les usagers.

Afin d'étudier qualitativement les résultats de cette recherche, nous proposons d'évaluer les projets obtenus à partir de quelques métriques qui apportent d'autres significations à la densité physique trouvée, comme par exemple, celles liées à la question de la mixité urbaine mentionnée précédemment. Pour cela, certains des paramètres déjà discutés ont été utilisés pour qualifier l'intensité des aspects relatifs à la diversité (morphologique et d'usage potentiel attribuée), à l'accessibilité et à l'adaptabilité (ADOLPHE, 2013; SALAT, 2011).

La *diversité* est un concept beaucoup utilisé quand nous parlons de développement durable. Appliqué au développement urbain durable, il exprime souvent la mixité d'usage du sol. Cette diversité physique peut être généralisée pour la morphologie de l'espace, la diversité sociale et fonctionnelle d'un site urbain (ADOLPHE, 2013). Pour caractériser cet aspect nous utilisons les indicateurs suivants: le coefficient d'occupation du sol, le coefficient d'emprise au sol, l'écart type de la hauteur moyenne bâtie et le rapport de la surface bâtie et non-bâtie (présence d'espaces vides au détriment des espaces construits, pour la création de sols perméables, par exemple).

L'accessibilité d'un lieu, définit, la façon dont un ou plusieurs individus, en utilisant plusieurs moyens de transport, peuvent se déplacer d'un lieu à l'autre. Premièrement, l'accessibilité dépend de distances entre les lieux d'origine et de destination. Dans le macro-zoning, la compacité de l'étalement urbain et le niveau de polarisation de l'urbanisation dans de diverses centralités d'un site urbain peuvent affecter drastiquement ces distances (CERTU, 2002) (MORENCY, 2006). Les indicateurs de compacité ou de dispersion urbaine peuvent être utilisés pour qualifier cette problématique. Pour illustrer cet indicateur, nous utilisons une des métriques proposée par Adolphe (2013) : la compacité urbaine. Cette métrique est définie par la racine carrée du ratio de la surface urbaine obtenue (dans ce cas, la surface de l'îlot) par son périmètre. D'autres aspects extrêmement importants ne sont pas considérés ici, tels que les supports physiques liés à la mobilité et la connectivité du réseau urbain, entre autres, qui sont aussi liés à cette problématique.

Il est important de mentionner un autre caractère extrêmement important dans le développement durable des villes : *l'adaptabilité* des espaces. C'est-à-dire, la capacité des espaces d'évoluer et de s'adapter à de nouvelles demandes et de nouvelles complexités. Seulement à titre illustratif, nous qualifions ici la capacité d'adaptabilité des îlots.

D'après Salat (2011), l'évolution des trames urbaines traditionnelles sont plus facilement adaptables et peuvent se reproduire par des redistributions du tracé viaire, la densification de patios internes ou les espaces de fonds des parcelles et le réaménagement des parcelles (SALAT, 2011^a). Cette

faisabilité est attribuée en partie à la forme du parcellaire urbain. Les plus petits ilots peuvent être densifiés individuellement sans trop endommager la trame urbaine. Darley et Zunino (2010) suggèrent que la régularité des tissus composés d'immeubles continus, alignés sur rue et des hauteurs relativement homogènes (avec des faibles écarts type de la hauteur bâtie) facilitent l'évolution, et permettent donc une insertion ou une modification plus facile dans la continuité de l'existant, en prolongeant les dimensions, la forme et l'alignement des ilots. Les pavillons individuels peuvent très facilement être densifiés et permettre une modification des parcelles. En contrepartie les mailles avec des bâtiments discontinues et de très forte densité verticale, présentent un potentiel d'adaptation plus difficile.

A partir des indications suggérées par Salat (2011) et par Darley et Zunino (2010), la forme des ilots urbains ont été qualifiées par rapport à leur capacité d'adaptation à des nouvelles interventions. Pour tout indicateur et ses respectifs paramètres morphologiques mentionnés, il a été attribué une note de 1 à 5, afin de qualifier et rendre plus facile la lecture des formes obtenues (voir tableaux 14-17).

5.3. Dispositifs pour l'aide à l'intervention urbaine

5.3.1. Proposition d'un code de micro-urbanisme

Les codes d'urbanisme ont un rôle crucial dans les processus de transformation de la morphologie construite dans les villes et, par conséquence, sur la performance environnementale des espaces. Au Brésil, les codes d'urbanisme présentent souvent des paramètres restrictifs basés sur des macro-zonings classiques monofonctionnels. Ces types de macro-zoning amènent progressivement les secteurs des villes, comme à Maceió, à une certaine uniformisation et sectorisation des fonctions et de la forme bâtie. Ces règles suggèrent la création de densités et de typologies spécifiques par quartier, basées souvent sur des intérêts économiques et politiques locaux. La sectorisation du tissu urbain sépare des districts par classe de revenu (ex. résidentiel I, II, III, résidentiels d'intérêt social, etc.), par des fonctions (ex. résidentiel, commercial, touristique, historique), ce qui entraîne une forte ségrégation des espaces et des usages et une augmentation des déplacements. En outre, la densité établie sur certaines zones a surchargé l'infrastructure, à l'exemple du quartier situé sur la plaine côtière de Maceió, dû au décalage entre la croissance de la demande et de l'évolution de l'infrastructure.

Très peu d'efforts ont été effectivement mis en œuvre pour que la planification proposée par des dispositifs régulateurs, tels que les règlements d'urbanisme, puisse aider à contrôler la qualité environnementale, et assurer une efficacité du point de vue énergétique des espaces bâtis. Il n'est pas suffisant d'établir des règles sur les paramètres morphologiques importants, tel que les densités, si elle ne sont pas basées sur des études multicritères ou si l'offre d'infrastructure (ex : l'électricité, l'eau, l'accessibilité, etc.) n'est pas anticipée.

Ce travail a mis en évidence les importants aspects de la forme urbaine au croisement des contraintes solaires et énergétiques, afin de contribuer avec des éléments de réponse qui soient pertinents à l'aide à la décision pour l'aménagement des villes, en permettant d'anticiper l'offre et la demande d'énergie d'origine solaire (extrêmement abondante dans la région).

À partir du répertoire de formes d'ilot solaire proposé dans ce travail, il est possible d'extrapoler les connaissances obtenues vers l'élaboration d'une bibliothèque de variantes possibles dans les mêmes intervalles de paramètres typo-morphologiques, à l'instar d'une grammaire de formes. Le choix de l'ilot est donc ici fonction des priorités (à la fois morphologiques et énergétiques) établies pour chaque district urbain.

Ainsi, il est possible de proposer des dispositifs d'adaptation, mais également d'insertion ou de modification dans l'actuel règlement d'urbanisme de Maceió : ce que nous appellerons un règlement de micro-urbanisme solaire. La proposition serait d'établir un urbanisme de granularité plus fine d'intervention, c'est-à-dire, en attribuant un ensemble de règles à l'échelle de la parcelle, par ilot ou par unité de voisinage (ex. gabarit par bâtiment ou ilot à gabarits multiples). La typologie des bâtiments resterait conditionnée à des paramètres restrictifs établis par parcelle urbaine à l'intérieur des ilots. Le code d'urbanisme à l'échelle de l'ilot permettrait un contrôle plus important de la qualité

environnementale et énergétique des espaces construits, compte tenu de l'impact important produit par la forme de l'environnement proche dans la performance des bâtiments. Par exemple, dans le cas des îlots proposés, si les hauteurs construites ou l'albédo prescrit ne sont pas respectés, le potentiel solaire prévu ne sera pas le même, en défavorisant l'efficacité du système. De la même façon, pour le potentiel de la forme à réduire ou augmenter l'irradiation et l'illumination sur les façades.

Avant que la ville soit totalement consolidée, l'approche de ce travail offre un certain nombre de formes proposées à partir de critères morphologiques et énergétiques, de façon intégrée. Le processus d'optimisation de la géométrie vers la recherche de projets plus efficaces, a permis d'établir au moins 85 projets différents (projets du front de solutions non-dominées), à partir desquelles, certaines peuvent être illustrées individuellement et contrastées dans tableaux 14 au 17. Cette approche offre, donc, une grande liberté de choix pour l'évolution de la ville, en permettant des réflexions sur une assez large variété d'îlots et de rangements possibles (à l'échelle du voisinage).

Quelle typologie d'îlots, quelle hétérogénéité ou diversité pour un contexte urbain donné? Quelle typologie d'îlots est plus compatible avec l'hétérogénéité d'un voisinage existant? Quelle typologie inter-îlots? Autrement dit, comment organiser un quartier urbain de manière à ce que la densité, l'usage, le potentiel de production et la demande potentielle d'énergie, puissent être prévus?

Nous proposons, donc, à partir des résultats obtenus, l'élaboration de **deux outils**, afin d'aider les acteurs urbains à répondre aux questions abordées :

- *Elaboration d'un code de micro-urbanisme solaire.*

Nous proposons l'adoption de paramètres établis par type d'îlot. Les tableaux ci-après montre un schéma possible d'un micro-zoning à l'échelle de l'îlot urbain proposé. Pour chaque type d'îlot, il est possible d'identifier son potentiel typologique en terme de densité (COS et CES), de diversité, d'accessibilité, d'adaptabilité, d'offre et de demande énergétique potentielle, et les dimensions par bâtiment ou par parcelle, à partir de leurs potentiels solaire.

Les tableaux illustrent et décrivent le profil et la performance estimés pour quelques îlots obtenus à partir du processus d'optimisation des paramètres morphologiques et des contraintes de la ville de Maceió. Nous cherchons, dans la suite, à comparer la performance de quelques types qui pourraient être employés pour l'aménagement et le micro-zoning d'un district urbain de la ville. Ensuite, un exemple d'intervention rapide est aussi indiqué.

Tableau 14: table synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'îlot type C4(1)6.

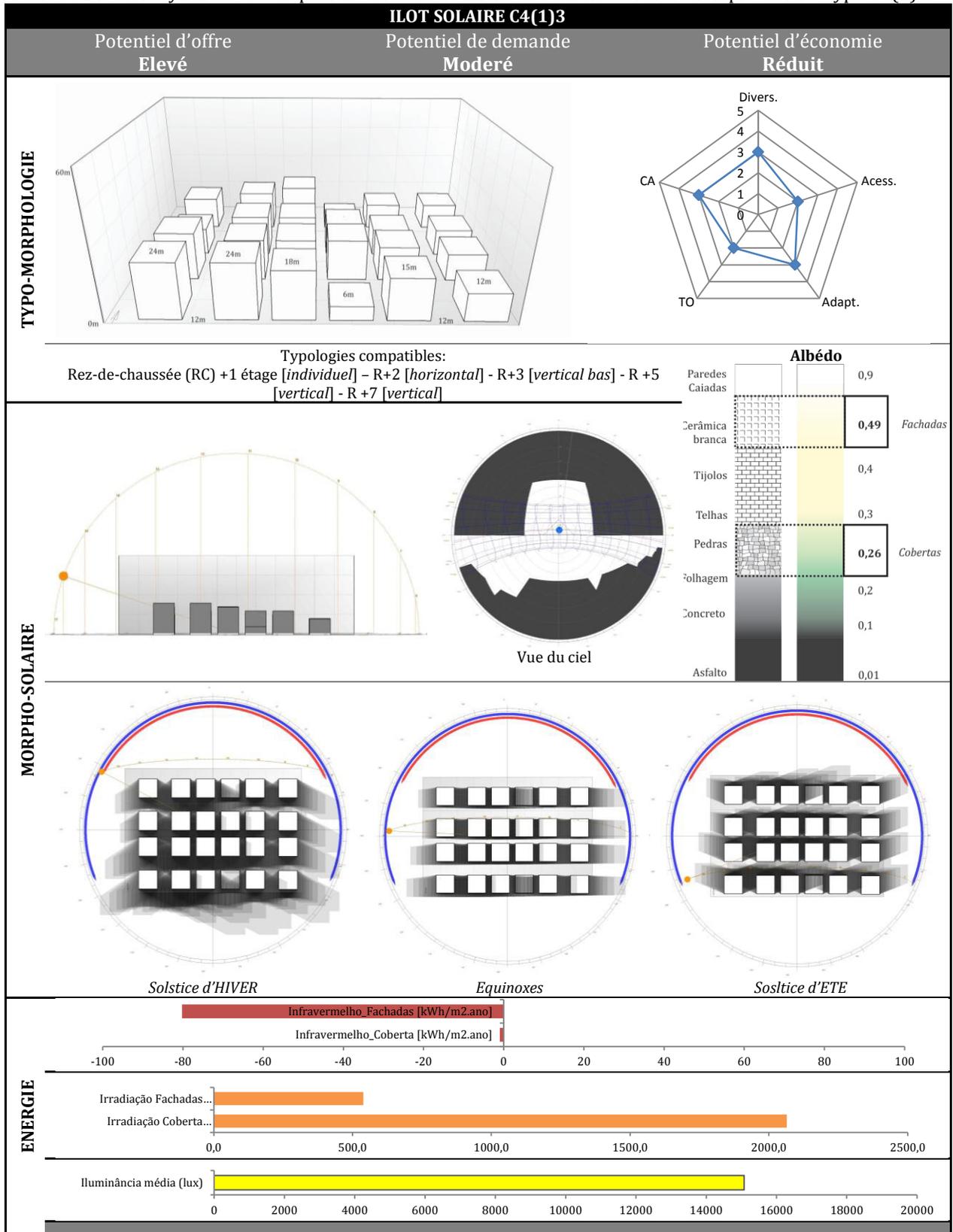


Tableau 15: table synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'îlot type C4(1)8.

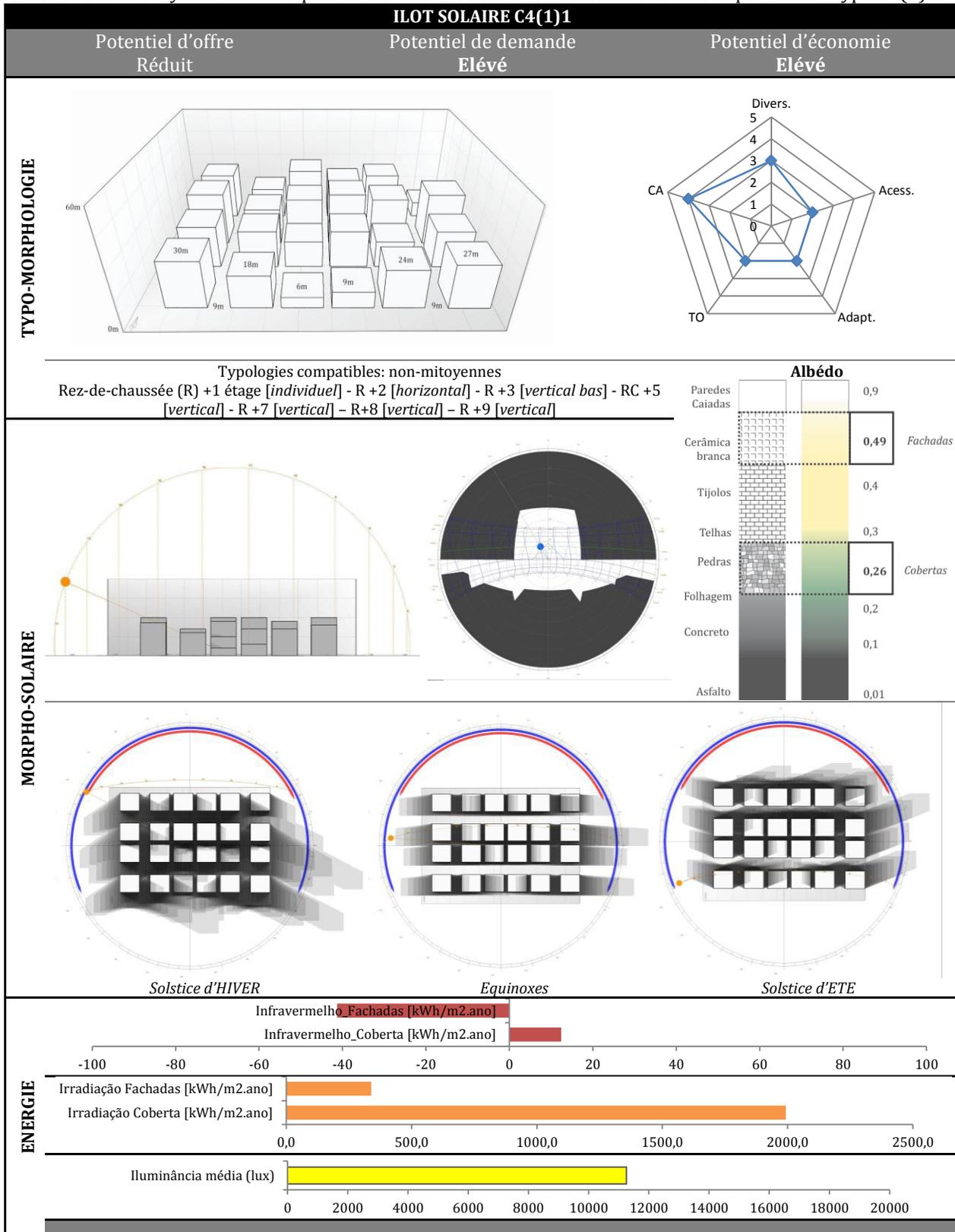


Tableau 16: table synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C4(2)9.

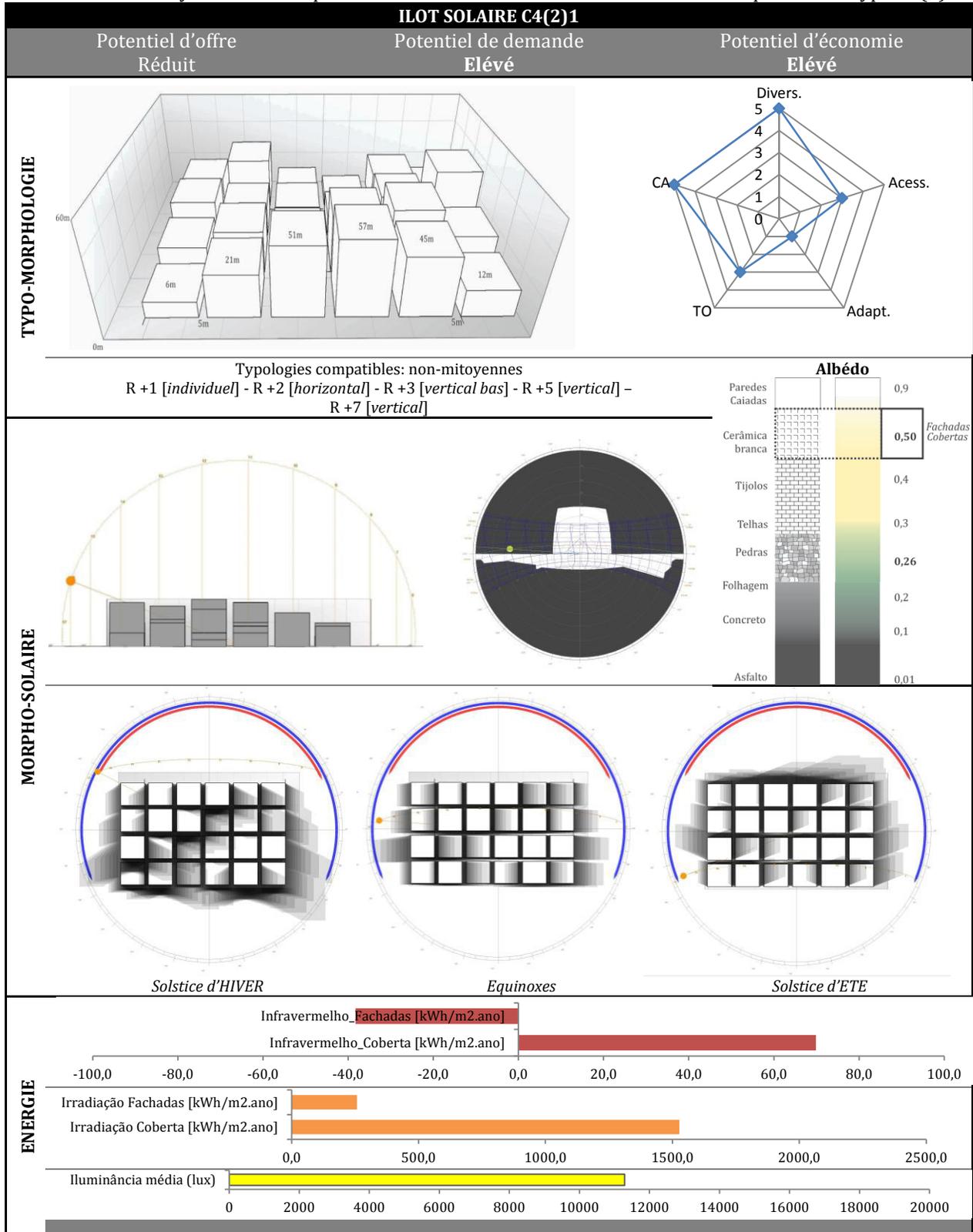
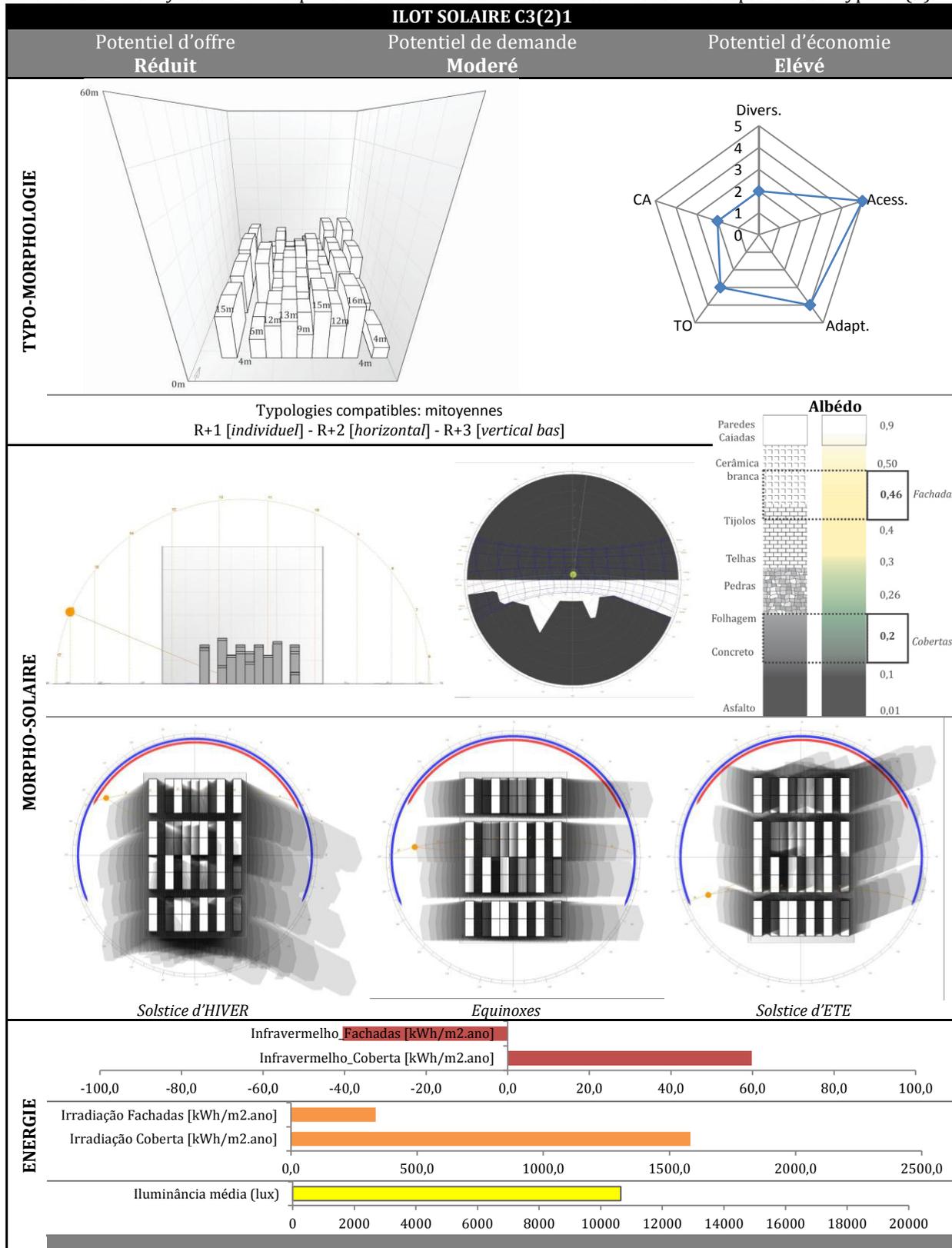


Tableau 17: table synthèse des dispositifs du code de micro-urbanisme solaire: exemple de l'ilot type C3(2).



Comme illustration, nous avons cherché à utiliser quelques possibilités typologiques d'îlot solaire pour la proposition d'une intervention sur un quartier urbain résidentiel, de morphologie horizontale et d'adaptabilité relativement intéressante, situé sur la plaine côtière de Maceió. Les schémas nous montre donc un futur possible, en considérant l'aménagement à l'échelle de l'îlot et du voisinage (Figure 29 - 31). Quatre types d'îlots solaires ont été aménagés pour le voisinage indiqué, en adaptant les dimensions et le tracé existants. La variabilité à l'intérieur des îlots et la complémentarité énergétique entre les îlots qui ont été proposés permettent d'examiner la complexité formelle (du paysage et des usages) nécessaire à un développement plus durable de la ville.



Figure 29: exemple d'intervention ponctuelle dans le quartier de la plaine côtière de Maceió - plan. Source: illustration de l'auteur.

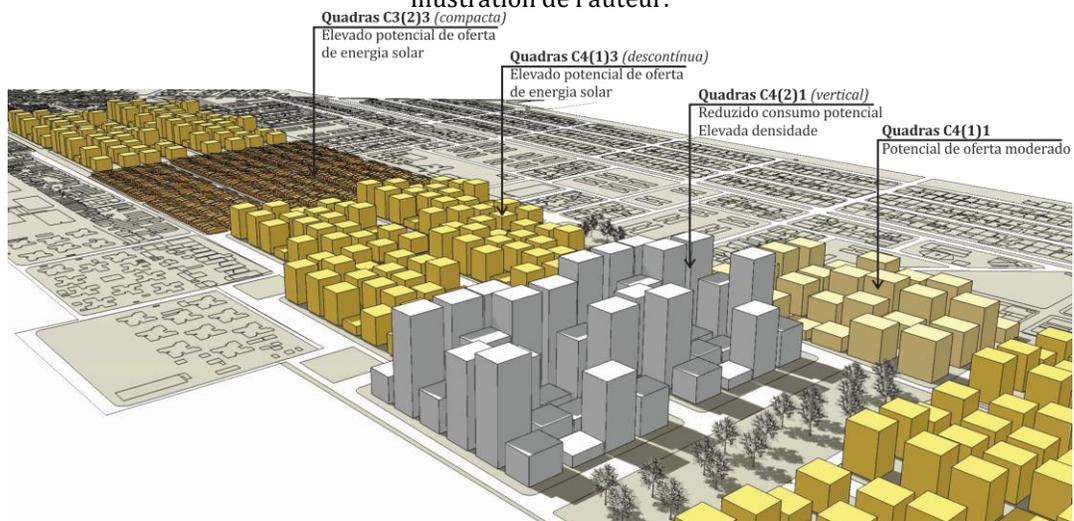


Figure 30: exemple d'intervention ponctuelle dans le quartier de la plaine côtière de Maceió – perspective et spécifications des typologies d'îlot solaire. Source: illustration de l'auteur.

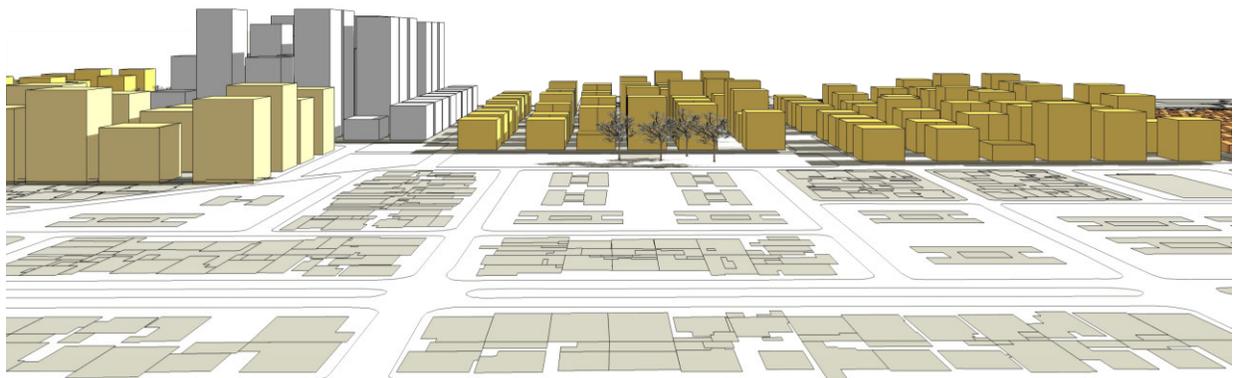


Figure 31: exemple d'intervention ponctuelle dans le quartier de la plaine côtière de Maceió - perspective. Source: illustration de l'auteur.

- *Elaboration d'un banc de données systématisé*

Nous proposons d'établir une série de données à partir des simulations réalisées. A partir de modèles mathématiques existants, il est possible d'interpoler les points non-calculés entre les points correspondant aux projets proposés¹, pour construire un large échantillon de projets ou une surface de réponse. Cette surface permettrait de rendre disponible les réponses (du potentiel solaire) trouvées pour une gamme complète de combinaisons possibles à partir des paramètres étudiés.

Un tel outil rendrait facile la proposition des typologies que puissent être comptabilisées de façon efficace et compatible avec la complexité déjà existante, en s'adaptant au processus de décision.

Une des méthodologies utilisable est la méthodologie de la surface de réponse (MSR). La MSR, aussi connue comme un modèle substitut, est une technique très utile pour la modélisation et l'analyse des applications où la réponse d'intérêt subit une influence de plusieurs variables et dans lesquelles l'objectif consiste à optimiser cette réponse. D'après Montgomery et Runger (2009), la première étape de la MSR consiste à trouver une approximation appropriée pour la vraie relation entre la réponse et les variables indépendantes.

L'utilisation de la MSR est particulièrement intéressante pour le problème abordé dans ce travail, car il implique l'analyse dynamique du bilan radiatif des façades de bâtiments à l'échelle urbaine, ce qui demande un temps de calcul relativement élevé, dû à l'échelle de travail. Dans le but de réduire ce coût et d'offrir plus d'efficacité au processus d'optimisation, il devient approprié d'utiliser des méta-modèles pour cartographier le comportement des géométries possibles en termes de paramètres de réponse d'intérêt, ce qui permet la prévision de cette réponse en fonction seulement des données d'entrée du système. À partir de cette cartographie, dans un processus d'optimisation, l'analyse dynamique peut être remplacée par la consultation directe de la surface de réponse cartographiée. La surface de réponse fournit des résultats fiables et est capable de réduire significativement le coût informatique associé à l'analyse d'optimisation.

Dans la littérature, il est possible de trouver des références diverses sur la description et l'application de techniques d'optimisation basées sur des méta-modèles (MYERS ET MONTGOMERY, 1995; WANG et al., 2001; WANG ET SHAN, 2007; GOMES, 2007; FONSECA, 2009; SONG et al., 2010). Dans ces références, les auteurs utilisent la MSR en ajustant les méta-modèles sur la base d'informations obtenues empiriquement dans les analyses précédentes et ils utilisent efficacement la surface cartographiée à partir du processus d'optimisation.

Les résultats présentés dans la littérature démontrent l'importance et les bénéfices accordés par l'utilisation de techniques de méta-modèles associées à des processus d'optimisation. Cette approche, néanmoins, n'est pas intégrée à la présente étude, mais son utilisation est fortement recommandée et suggérée pour la continuité du travail.

Uniquement à titre d'illustration, une surface de réponse simple a été construite à partir d'un des ensembles de simulation produits, pour certaines des variables étudiées et à l'aide du modèle évolutionnaire de régression (*Evolutionary Design model*) (Figure 32). Nous ne détaillerons pas ici la méthodologie ni les procédures mathématiques engagées dans la constitution de cette surface, car il ne fait pas partie des objectifs de ce travail, mais des déroulements futurs de la recherche.

¹ L'ensemble de simulations (de huit séries de simulations), a permis de générer plus de 40.000 projets restreint d'ilot urbain faisables pour différentes performances énergétiques..

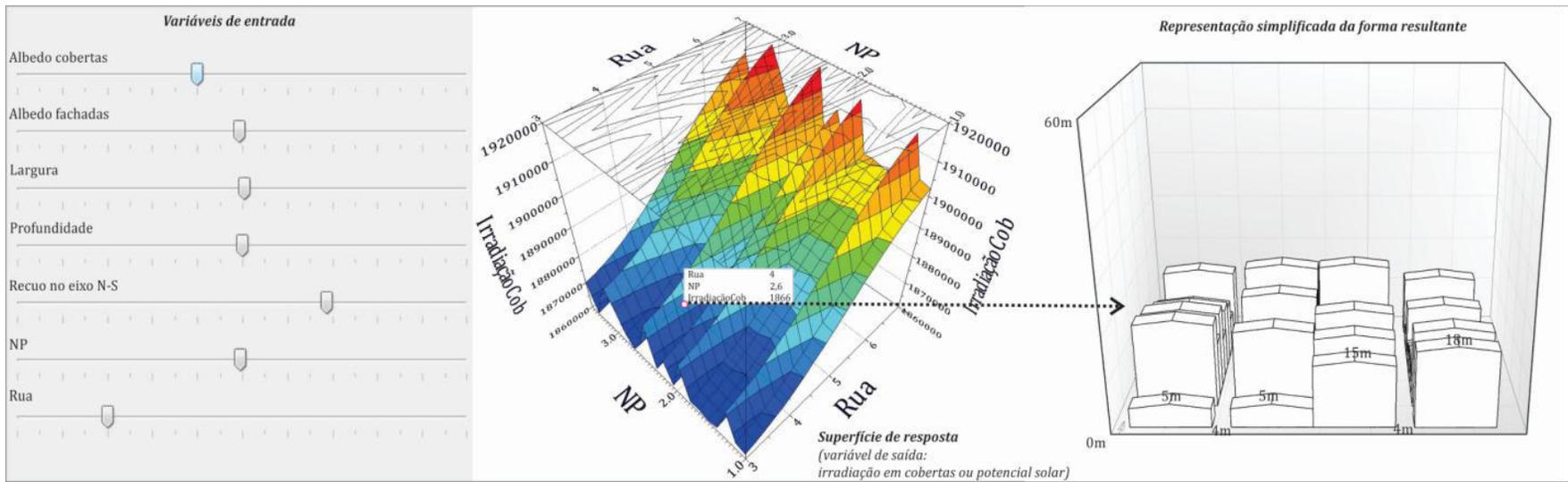


Figure 32: maquette d'un outil d'aide à la décision à partir de la méthode MSR à l'aide d'un algorithme de régression évolutionnaire. Source: adapté de modeFRONTIER, 2013.

6. CONCLUSIONS

Compte tenu de la complexité de la morphologie urbaine et des interactions entre les différentes échelles du bâti (urbaines et architecturale), ce travail a été motivé par la connaissance toujours limitée sur l'adaptation des typologies urbaines pour relever le défi énergétique en milieu urbain des régions tropicales : le contrôle de la surchauffe due aux apports solaires sur les façades et l'énorme potentiel de production d'énergie solaire par les bâtiments urbains. Dans le but de trouver des éléments de réponse à ces questions, ce travail présente une approche méthodologique interdisciplinaire qui vise évaluer le potentiel solaire des typologies urbaines existantes, précédemment identifiés dans le tissu urbain de Maceió, afin de comprendre leur performance actuelle et de les comparer aux résultats explorées par le processus d'optimisation.

Une étude statistique sur la sensibilité des principaux facteurs morphologiques nous a fourni des informations importantes concernant leur contribution sur les réponses d'intérêt. Les tests de signification ont permis de hiérarchiser les facteurs en fonction de leur importance relative sur l'amélioration du potentiel énergétique solaire sur les toitures et le contrôle solaire sur les façades verticales. En optimisant les facteurs les plus pertinents, il a été possible de générer des scénarios urbains plus efficaces que les existants. Un élargissement des possibilités de l'actuel code urbain a permis d'améliorer de 24 % le potentiel solaire des façades tout en gardant l'éclairage naturel à des niveaux satisfaisants.

Cette travail de recherche a étudié l'optimisation des principaux facteurs morphologiques faisant partie des premières décisions de conception où les choix seront déterminants pour l'efficacité énergétiques des bâtiments.

Une telle approche interdisciplinaire peut être très pertinente dans la définition efficace et objective d'un ensemble de paramètres qui puissent répondre à un compromis raisonnable entre les différentes mesures conflictuelles d'efficacité, tout en préservant un ensemble de critères importants et conjoncturels. Cette méthode conduit à un ensemble d'indicateurs relativement complet qui peut être appliqué d'une part, dans le cadre d'une révision des règlements d'urbanisme, et d'autre part en permettant des interventions ponctuelles sur un quartier notamment dans un contexte d'évolution urbaine rapide. Dans ce sens, la présente étude pourrait aussi être utilisée comme outil d'aide à la priorisation des actions dans l'élaboration des règles d'urbanisme, ainsi que dans la pratique de projets urbains. Face à la complexité urbaine et le défi lié à la conception de formes mieux adaptées aux contraintes urbaines et environnementales, l'utilisation des méthodes d'optimisation apparaît donc extrêmement prometteuse.

7. REFERENCES

- ABNT. NBR15215-3/2004. Iluminação natural – Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos.. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro: ABNT, , p. 33. 2004.
- ACHARYA, P. K. et al. **MODTRAN user's manual versions 3.7 and 4.0**. Air Force research Laboratory. [S.l.]. 1998.
- ADENE. **Eficiência energética dos edifícios residenciais**. ADENE. Lisboa. 2008.
- ADOLPHE, L. **L'intégration des contraintes techniques dans le processus de conception architecturale**. EMP. Paris. 1995.
- ADOLPHE, L. A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 28, p. 183-200, 2001.
- ADOLPHE, L. et al. **SAGACités Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines**. MENRT. Toulouse. 2002.
- AIDA, M.; GOTOH, K. Urban albedo as a function of the urban structure - a two dimensional numerical simulation (Part II)". **Boundary Layer Meteorology**, v. 23, p. 415-423, 1982.
- AIDA, M.; GOTOH, K. Urban albedo as a function of the urban structure – a two- dimensional numerical simulation. **Boundary-Layer Meteorology**, 23, n. 4, 1982. 415- 424.
- AIT-AMEUR, K. **Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains: validation d'un système d'indicateurs «morpho-climatiques et d'un indicateur de confort**. Tese (Doutorado em Arquitetura). Université de Nantes. Nantes. 2002.
- AIT-AMEUR, K. **Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains: validation d'un système d'indicateurs «morpho-climatiques et d'un indicateur de confort**. Tese (Doutorado em Arquitetura). Université de Nantes. Nantes. 2002.
- ALBERTI, M.; WADDELL, P. An integrated urban development and ecological simulation model.. **Integrated Assessment**, v. 3, n. 1, p. 215-227, 2000.
- ALCOFORADO, M. J. . et al. **Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa**. Universidade de Lisboa.. [S.l.]. 2005.
- ALENCAR, B. J. **A análise multivariada aplicada ao tratamento da informação espacial: uma abordagem matemático-computacional em análise de agrupamentos e análise de componentes principais**. Tese (Doutorado em Geografia), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 200. 2009.
- ALLARD, F.; SANTAMOURIS, M. **Natural ventilation in buildings: a design handbook**. Londres: James & James, 1998.
- AMORIM, L.; BARROS FILHO, M. N.; CRUZ, D. **Urban Texture and Space Configuration Analysing Recife's Urban Fragments**. 7th International Space Syntax Symposium. Stockholm: KTH. 2009.
- ANGSTROM, A. **A study of the radiation of the atmosphere**. [S.l.]: Smithsonian Int. Misc. Coll., v. 65, 1915. 1-159 p.
- APUR. **Densités vécues et formes urbaines. Étude de quatre quartiers Parisiens**. Atelier Parisien d'Urbanisme. Paris. 2003.
- APUR. **Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes**. Paris: Atelier Parisien d'Urbanisme, 2007.
- ARANTES, L. **Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située**. Tese (Doutorado em matériaux, mécanique, génie civil et électronique), Université de Grenoble. Grenoble, p. 456. 2012.

- ARNFIELD, A. Two decades of urban climate research : a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, 1, n. 23, 2003. 1-26.
- ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e Metaheurísticas para Otimização Combinatória Multiobjetivo**. Tese (Doutorado em Computação). Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.
- ARTIS, D. A.; CARNAHAN, W. H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. **Remote sensing of environment**, 12, 1982. 313-329.
- ASAEDA, T.; CA, V. T.; WAKE, A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. **Atmospheric Environment**, 30, n. 3, 1996. 413-427.
- AUGOYEARD, F. L'environnement sensible et les ambiances architecturales. **l'Espace Géographique**, v. 4, p. 302-318, 1995.
- AYMONINO, C. **O significado das cidades**. Lisboa: Editorial Presença, 1984.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 1, 1996. 332 p.
- BAKER, N. V.; STEEMERS, K. A. **LT Method Version 2.0**. Cambridge: Cambridge Architectural Research Ltd, v. 1, 1994.
- BANDO, M. et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. **Physical Review**, v. 51, n. 2, p. 1035-1042, 1995.
- BANOS, R. et al. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1753-1766, 2011.
- BARBIRATO, G. M. **Aplicação do Modelo de Balanço de Energia para Análise do Ambiente Térmico Urbano de Maceió – AL**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 1998.
- BARBOSA, A. M.; RIBEIRO, L. C.; ARANTES, J. M. O. **Algoritmo Genético Multiobjetivo: Sistema Adaptativo Com Elitismo**. 9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications. Serra Negra, São Paulo, Brasil.: [s.n.]. 2010.
- BATTY, M.; LONGLEY, P. **Fractal Cities: a Geometry of Form and Function**. Londres: Academic Press, 1994.
- BEHLING, S.; BEHLING, S. **Sol Power. The evolution of solar architecture**. Munique: Éditions Prestel, v. 1, 1996. 240 p.
- BENENSON, I.; ARONOVICH, S.; NOAM, S. **OBEUS: Object-Based Environment for Urban Simulation**. 6th international conference on GeoComputation. Brisbane, Australie: [s.n.]. 2001. p. 1-10.
- BENZERZOUR, M. **Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique"**. Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. Nantes. 2004.
- BERARDI, U. Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable. **Sustainable cities and society**, v. 8, p. 72-28, 2013.
- BERDAHL, P.; FROMBERG, R. The thermal radiance of clear skies. **Solar Energy**, 29, n. 4, 1982. 299-314.
- BERDAHL, P.; MARTIN, M. Emissivity of clear skies. **Solar Energy**, 32, n. 5, 1984. 663-664.
- BHIWAPURKAR, P.; MOSCHANDREAS, D. Street geometry and energy conservation of urban buildings in Chicago. **Intelligent Buildings International**, v. 2, p. 233-250, 2010.
- BITTENCOURT, L. **Uso das cartas solares. Diretrizes para arquitetos**. Maceió: EDUFAL, v. 1, 2005.
- BITTENCOURT, L. S. **Ventilation as a cooling resource for warm-humid climates: An investigation on perforated block wall geometry to improve ventilation inside low-rise buildings**. Londres: Architectural Association Graduate School, 1993. 314 p.

- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 2. ed. Maceió: EDUFAL, v. 1, 2005.
- BJARKE INGELS GROUP. **Reciprocity, Réponse à l'appel à projets Low2No Competition by SITRA**. [S.l.], p. 72. 2009. (Entry no.76520).
- BLENNOW, K. Sky View Factors from High-Resolution Scanned Fish-eye Lens Photographic Negatives. **Journal Atmospheric and Oceanic Technology**, p. 1357-1362, 1995.
- BLOCKEN, B.; JANSSEN, W. D.; HOOFF, T. V. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. **Environmental Modelling & Software**, 30, 2012. 15-34.
- BOAS, M. V. **Significado da arquitetura nos trópicos- um enfoque bioclimático**. Seminário Nacional sobre Arquitetura nos Trópicos. Recife: Fundação Joaquim Nabuco. 1985. p. 40.
- BONHOMME, M. **Contribution à la generation des bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine**. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Toulouse, p. 540. 2013.
- BONHOMME, M.; MASSON, V.; ADOLPHE, L. **The block generator: A tool for classification and evolution of urban typologies to assess environmental performances at the city scale**. PLEA - Passive and Low Energy Architecture. Lima, Peru: [s.n.]. 2012. p. 1-6.
- BORDAS-ASTUDILLO, F. **Quelle forme urbaine pour quelle densité vécue ?** Atelier Parisien d'Urbanisme. [S.l.], p. 4. 2003. (10).
- BOTTEMA, M. Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion, *Atmos. Environ.* 18, 3059-3075. **Atmospheric Environment**, v. 18, p. 3059-30175, 1997.
- BOUDON, R.; BOURIAUD, F. **Dictionnaire critique de la sociologie**. 1. ed. Paris: PUF, v. 1, 1982.
- BOUSSOUALIM, A. **Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur**. Université de Nantes. Nantes. 2002.
- BOYEUR, J. **Modélisation et simulation des microclimats urbains. Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments**. [S.l.]: École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, 2009.
- BRASIL. **Balço Energético Nacional 2013: ano base 2012 - relatório síntese**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. 2013.
- BRASIL. **Lei n. 10295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia**. Lex: Diário Oficial da União. Brasília. 2001.
- BRONIN, S. C. Solar rights. In: ____ **BOSTON UNIVERSITY LAW REVIEW**. [S.l.]: [s.n.], v. 89, 2009.
- BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. **J. R. Met. Soc.**, 28, 1932. 389-418.
- BUENO, F. **Métodos Heurísticos: Teoria e Implementações**. Tutorial. Instituto Federal de Santa Catarina. Araranguá,SC, Brasil. 2009.
- BULHÕES, R. L. **Método de redução de perdas elétricas em sistema de distribuição**. Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2011.
- BUREAU, P. R. **World Population Data Sheet**. [S.l.]. 2009.
- BUREAU, P. R. **World Population Data Sheet**. [S.l.]. 2009.
- BUTERA, F. Towards the renewable built environment. In: DROEGE, P. **Urban energy transistion: from fossil fuels to renewable power**. Amsterdam: Elsevier, 2008.

- CABUS, R. **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil**. Sheffield University. Sheffield. 2002.
- CALDAS, L. G.; NORFORD, L. K. A design optimization tool based on a genetic algorithm.. **Automation in Construction**, v. 11, n. 2, p. 173–184, 2002.
- CALVINO, Í. **Cidades invisíveis**. 12. ed. Alfragide: Teorema, v. 1, 2008.
- CAMPOS-ARRIAGA, L. **Wind Energy in the Built Environment: A Design Analysis Using CFD and Wind Tunnel Modelling Approach**. PhD thesis, University of Nottingham. [S.l.]. 2009.
- CANAN, A. **Performative architecture as a guideline for transformation of the defence line of Amsterdam**. Middle East Technical University. Delft, p. 107. 2011.
- CANEPARO, L.; GUERRA, F.; MASALA, E. **UrbanLab – Generative platform for urban and regional design**. 8th International DDSS Conference. Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning. Eindhoven, The Netherlands: [s.n.]. 2006. p. 235-251.
- CANTAT, O. **Téledétection spatiale et microclimats – Le cas de la région Ile-de- France**. Paris: [s.n.], 1987. 190 p.
- CAPULETO, I.; GUEDI, S. E. On the use of ‘solar volume’ for determining the urban fabric”. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 275-280, 2001.
- CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 1: método prescritivo.. **Ambiente Construído (online)**, Porto Alegre, RS, Brasil, v. 10, n. 2, p. 7-26, 2010.
- CARVALHO, A. Smart-grids: a luz que faltava ao mercado. **Ambiente Energia**, Janeiro 2014.
- CASTRO, E. B. P. D. **Método de Auxílio à Concepção Arquitetônica Baseado na Análise Multicritério e em Dados Simulados dos Comportamentos da Edificação**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.
- CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. **Recent Developments In Biologically Inspired Computing**. [S.l.]: Idea Group Publishing, 2004.
- CATTELL, R. B. The screen test for the number of factors. **Multivariate Behavioral Research**, v. 1, p. 245-276, 1966.
- CAVALCANTE, M. M. P. D. **Meio Ambiente Construído, Globalização e Sustentabilidade Cultural – Estudo de Caso: O Bairro de Ponta Verde (Maceió)**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil. 2000.
- CELANI, G. An educational experiment with shape grammars and computer. **International Journal of Design Computing**, v. 3, 2002.
- CHANGNON, S. A. Inadvertent weather modification in urban areas: Lessons for global climate change. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 73, n. 5, p. 619-627, 1992.
- CHAPMAN, L. Sky-view factor approximation using GPS receivers. **International Journal of Climatology**, v. 22, n. 5, p. 615-621, 2002.
- CHEN, H.; JIA, B.; LAU, S. S. Y. Sustainable urban form for chinese compact cities: challenges of a rapid urbanized economy. **Habitat International**, v. 32, n. 1, p. 28-40, 2008.
- CHENG, V. et al. **Urban form, density and solar**. The 23rd PLEA Conference. Geneva, Suíça, 2006: [s.n.]. 2006. p. 6.
- CHIMKLAI, P.; HAGISHIMA, A.; TANIMOTO. A computer system to support Albedo Calculation in urban areas.. **Building and Environment**, 39, Jun 2004. 1213-1221.
- CHIRKOV, V. Anthropogenic Heating of the Atmosphere. **Anthropogenic Heat**, 2003. <http://www.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/heat/>.

CIE. **Standardisation of luminous distribution on clear skies**. Commission Internationale de l'Éclairage. Vienna. 1973.

CIE. **Spatial distribution of daylight - CIE Standard Overcast Sky and clear sky**. Commission Internationale de l'Eclairage. Vienna. 1996.

CIE. **Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky**. Commission Internationale de l'Éclairage. Vienna. 2002.

CLARKE, K. C.; GAYDOS, L. J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 7, p. 699-714., 1998.

CLOSE, J. The integration of photovoltaics within high-rise buildings in the dense urban environments of SE Asia, consideration of legislation to promote it and to maintain solar energy access. **Renewable Energy**, 8, n. 1, 1996. 471-474.

COELHO, G. A. G.; AFONSO, S. M. B.; HOROWITZ, B. **Estudos Iniciais para a Construção de uma Ferramenta de Seleção Automática de Parâmetros dos Algoritmos Genéticos**. Anais do XXXII CILAMCE. Ouro Preto, MG: [s.n.]. 2011. p. 1-11.

COELLO, C. A. C. Evolutionary Multi-Objective Optimization: A Historical View of the Field. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, v. 1, n. 1, p. 28-36, 2006.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B. L.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. [S.l.]: Springer, v. 1, 2007.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B. L.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2007.

COENEN-HUTHER, J. Compréhension sociologique et démarches typologiques. **Revue Europeenne des Sciences Sociales**, Genève, v. Tome XLIV, n. 135, p. 195-205, 2006.

COHON, J. **Multiobjective Programming and Planning**. [S.l.]: Courier Dover Publications, 2004.

COLOMBERT, M. **Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville**. Université Paris-Est. Paris. 2008.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE. **Quatrieme rapport annuel au Parlement sur la mise en œuvre des engagements du Grenelle Environnement**. Ministere de l'Ecologie, du developpement durable et de l'energie. Paris. 2012a. Consultado na internet em: http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/4e_rapport_grenelle_finale_COMPLET-2.pdf.

COMPAGNON, R. **PRECis: Assessing the Potential for Renewable Energy in Cities, Annexe3: Solar and daylight availability in urban areas**. University of Applied Sciences of Western Switzerland (HES-SO). Fribourg. 2000.

COMPAGNON, R. Solar and daylight availability in the urban fabric. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 4, p. 321-328, 2004.

COMPAGNON, R.; RAYDAN, D. **Irradiance and illuminance distributions in urban areas**. PLEA - 17st International Conference on Passive and Low Energy Architecture. [S.l.]: [s.n.]. 2000.

COOPER, P. I. The absorption of solar radiation in solar stills. **Solar Energy**, 12, n. 3, 1969. 333-346.

CORBIN, A. **Le miasme et la jonquille**. Paris: Flammarion, 2008.

CORBUSIER, L. **Carta de Atenas**. São Paulo: Hucitec, 1933.

COUTARD, O.; RITHERFORD, J. Les réseaux transformés par leur marges: développement et ambivalence des techniques "descentralisées". **Flux**, v. 2, n. 76-77, p. 6-13, 2009.

- CRUTZEN, P. J. New directions: The growing urban heat and pollution « island » effect – impact on chemistry and climate. **Atmospheric Environment**, 38, 2004. 3539-3540.
- CRUZ, J. M. **Sustentabilidade do ambiente construído: Conservação de energia através do uso da ventilação natural como forma de refrigeração passiva do ambiente urbano**. Dissertação (mestrado em Arquitetura), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil, p. 220. 2001.
- CURRELI, A.; COCH, H. **Solar access in the compact city: a study case**. PALENC 2010: Passive and Low Energy Cooling of Built Environment. Rhodes Island, Greece: [s.n.]. 2010. p. 1-10.
- DE JONG, K. **Evolutionary Computation - a Unified Approach**. Cambridge: MIT Press, v. 4, 2006.
- DEB, K. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**. New Jersey: John Willey and Sons, 2001.
- DEB, K. **Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples**. 8. ed. New Delhi: Prentice Hall of India Private Limited, 2005.
- DEB, K. et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.
- DEL RIO, V. **Introdução ao desenho urbano no processo de planejamento**. 5. ed. São Paulo: Pini, v. 1, 2000.
- DEMAZIERE, D.; DUBAR, C. **Analyser les entretiens biographiques. L'exemple de récits d'insertion**. 1. ed. Paris: Nathan, v. 7, 1997.
- DENÈGRE, J.; SALGÉ, F. **Les systèmes d'information géographiques**. Paris: PUF, 1997.
- DETTWILLER, J. L'évolution séculaire de la température à Paris. **La Météorologie**, 13, 1978. 95-130.
- DIDAY, E. et al. **Eléments d'analyse de données**. Paris: Editions Dunod-Bordas, v. 1, 1982.
- DORIGO, M. **Optimization, Learning and Natural Algorithms**. Tese de Doutorado. Politecnico di Milano. Milano, Italie. 1992.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents Colony of Cooperating Agents. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B**, v. 26, n. 1, p. 29-41, 1996.
- DUARTE, J. et al. **Alberti Digital – Tradição e inovação na teoria e prática da arquitetura em Portugal**. SIGRADI 2012 | FORMA (IN) FORMAÇÃO. Fortaleza - Brasil: [s.n.]. 2012. p. 212-215.
- DUBOIS, C.; BERGERON, O. **Adapting cities to climate change: heat and urban form**. ICUC8. Dublin: [s.n.]. 2012.
- DUFFIE, J. A.; BECKMANN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: Wiley, 1980. 792 p.
- EERE. **Building energy software tools directory**. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. [S.l.]. 2008.
- ELIASSON, I. The use of climate knowledge in urban planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 48, p. 31-44, 2000.
- ELLERKAMP, P. **Simulation de dynamiques spatiales, Exemple de la densification de la population autour d'Avignon**. V rencontre de Théo Quant. Besançon: [s.n.]. 2001.
- ESCOURROU, G. **Climat et environnement, les facteurs locaux du climat**. Masson: [s.n.], 1981. 168 p.
- ESCOURROU, G. **Le climat et la ville**. Paris: Presses universitaires Nathan, 1991.
- ESTOURNEL, C. et al. Observations and modeling of downward radiative fluxes (solar and infrared) in urban/rural areas. **Journal of climate and applied meteorology**, 22, 1983. 134-142.
- EWING, R.; PENDALL, R.; CHEN, D. Measuring Sprawl and Its Impact. **Sprawl and Health**, 2002.
- FERRARI, C. **Curso de planejamento municipal integrado**. São Paulo: Pioneira Editora, 1979.

- FILHO, N. G. R. **Quadro da arquitetura no Brasil**. São Paulo: Perspectiva, v. 1, 1970.
- FISHBURN, P. C. Methods for estimating additive utilities. **Management Science**, v. 1, n. 7, p. 435-453, 1967.
- FISHER, R. A. **The Design of Experiments**. 9 Ed. ed. [S.l.]: Macmillan, 1971.
- FLÉTY, Y. et al. **étiquettes énergétiques de mobilité: un indicateur pour la ville durable**. Actes du Congrès Mondial de l'Énergie. [S.l.]: [s.n.]. 2010.
- FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. **Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization**. International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo, EUA: [s.n.]. 1993.
- FONTENELLE, M. **A abordagem multicritério na concepção arquitetônica: um estudo sobre as aberturas laterais em edifício de escritórios no Rio de Janeiro**. Dissertação (mestrado em Arquitetura). Programa de Pós-graduação em Arquitetura. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.
- FOSTER, N. Foster and Partners. **Foster and Partners**, 1998. Disponível em: <<http://www.fosterandpartners.com/>>. Acesso em: setembro 2013.
- FOUAD, A. O. **Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Université du Laval. Quebec. 2009.
- FOUCHIER, V. **Les densités urbaines et le développement durable: le cas de l'île-de-France et des villes nouvelles**. Paris: Éditions du SGVN, 1998.
- FREYRE, G. **Novo mundo nos trópicos**. São Paulo: Nacional/EDUSP, v. 1, 1969.
- GÜRSEL DİNO, İ. CREATIVE DESIGN EXPLORATION BY PARAMETRIC GENERATIVE SYSTEMS IN ARCHITECTURE. **METU Journal of the Faculty of Architecture**, v. 29, n. 1, p. 207-224, 2012.
- GALSTER, G. . H. R. . R. M. R. **Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept**. Housing Policy Debate. [S.l.], p. 681-717. 2001. (12).
- GICQUEL, R. **Approche systémique et thermique instationnaire**. Actes du colloque SFT92 de thermique Systèmes thermiques instationnaires. Paris: École des Mines de Paris. 1992. p. 337-355.
- GIVONI, B. **Climate considerations in building an Urban Design**. Londres: John Wiley & Sons, v. 1, 1998. 480 p.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. 1. ed. Boston, EUA.: Addison-Wesley LongmanPublishing, 1989.
- GORAL, C. M. et al. "Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces." **Computer Graphics**, 18, n. 3, 1984.
- GRAZZIOTIN, P. **Visualization Techniques in a Building Potential Simulator Using Sunlight Access Control**. SIACG – Ibero-American Symposium in Computer Graphics. Guimaraes, Portugal: [s.n.]. 2002.
- GRIMMOND, C.; OKE, T. R. Heat storage in urban areas, local-scale observations and evaluation of a simple model. **Applied Meteorology**, v. 38, p. 922-940, 1999.
- GROLEAU, D. **Analyse de la variation de l'albédo effectif urbain en fonction de la densité construite et de la forme urbaine**. CERMA. Nantes, França. 2008.
- GROLEAU, D.; MARENNE, C. **Environnemental specificities of the urban built forme**. Rebuildrebuilding the European city, Integration renewable energies in established urban structure. Corfou: [s.n.]. 1995. p. 8.
- GROSSO, M. Urban form and renewable energy potential. **Renewable Energy**, 1998. 331-336.
- HASTINGS, R. S. **The Evolution of solar architecture**. [S.l.]: Swiss Federal Office of Energy, 2002.
- HAUGHTON, G.; HUNTER, C. **Sustainable cities**. Londres: Jessica Kingsley, 1994.

- HAY, J. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. **Solar Energy**, 23, n. 3, 1979. 301-307.
- HELBING, D.; MOLNAR, P.; MINGOTAUD, M.-J. **Modélisation et simulation des flux de piétons**. Congrès Modélisation du trafic, Groupe de travail, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité. Arcueil: [s.n.]. 1997. p. 53-79.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. [S.l.]: University of Michigan Press, 1992.
- HOPKINSON, R. G.; KAY, J. D. **The lighting of buildings**. Londres: Faber and Faber, v. 2, 1972.
- HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Daylighting**. Londres: Heinemann, v. 1, 1966.
- HORN, J.; NAFPLIOTIS, N. **Multiobjective Optimization Using the Niche Pareto Genetic Algorithm**. IlliGAL Report No. 93005, Illinois Genetic Algorithms Laboratory, University of Illinois. Urbana, Champaign. 1993.
- HUANG, J.; LUB, X. X.; SELLERS, J. M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. **Landscape and Urban Planning**, v. 82, p. 184-197, 2007.
- HUI, S. C. Low energy building design in high density urban cities. **Renewable Energy**, v. 24, p. 627-640, 2001.
- IBGE. **Censo Demográfico 2010: Características da População e dos Domicílios - Resultados do Universo**. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Rio de Janeiro, p. 270. 2010.
- IEA. **Cities, towns and Renewable energy - Yes in my front yard**. International Energy Agency. [S.l.]. 2009.
- IRANZO, M. M. et al. Applied Pareto Multi-Objective Optimization by Stochastic Solvers. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 22, p. 455-465, 2009.
- JACOBS, J. **Morte e vida nas grandes cidades**. São Paulo: Martins Fontes, 2000.
- JANTZ, C. A. et al. Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, p. 1-16, 2010.
- JARRETT, H. R. **Tropical geography. "Aspect" geographies**. Plymouth: MacDonald & Evans, 1977.
- JIANG, Y. **Does Energy follows urban form? an examination of neighborhood and transport energy use in Jinan, China**. Massachusetts Institute of technology. Massachusetts, p. 163. 2010.
- JORMAKKA, K.; SCHÜRER, O.; KUHLMANN, D. **La Recherche de la forme**. Berlim: Birkhäuser, v. Coll. Basics, 2008.
- JUDET DE LA COMBE, A. et al. **Principes de l'Aéraulique Appliqués au Génie Climatique. Principles of air movement applied to thermal analysis of buildings**. Paris: PYC Editions, 1991.
- KÖPPEN, W. **Das Geographische System der Klimate**. Berlin: Kraus-Thomson, 1936.
- KAMPF, J. **On the modelling and optimization of urban energy fluxes**. Tese (Doutorado em Meio Ambiente). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, Suisse. 2009.
- KEENY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs**. Nova Iorque: Wiley and Sons, 1976.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. **Particle Swarm Optimization**. IEEE, IV Conference on Neural Networks. [S.l.]: [s.n.]. 1995. p. 1942-1948.
- KITTLER, R. **Standardisation of the outdoor conditions for the calculation of the Daylight Factor with clear sky**. Conf. Sunlight in Buildings. Rotterdam: Bouwcentrum. 1967. p. 273-286.
- KLUCHER, T. M. Evaluation of models to predict insolation on tilt surfaces. **Solar Energy**, 23, n. 2, 1979. 111-114.
- KNIGHT, T. W. **Shape grammar in education and practice: history and prospects**. MIT. Massachusetts. 1999. (MIT Workshop on Shape Computation).

- KNOWLES, R. L. **Energy and Form: An Ecological Approach to Urban Growth**. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 1974.
- KNOWLES, R. L. **Sun Rhythm Form**. Cambridge, Massachusetts: Éditions MIT Press, 1981.
- KNOWLES, R. L. The Solar envelope: its meaning for energy and buildings. **Energy and Buildings**, v. 35, p. 15.25, 2003.
- KOENIGSBERGER, O. H. et al. **Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales**. Madrid: Paraninfo, v. 1, 1977.
- KONDO, A. et al. The influence of the urban canopy configuration on urban albedo. **Boundary Layer Meteorology**, v. 100, n. 2, p. 225-242, 2001.
- KRETZ, T. **Pedestrian Traffic, Simulation and experiments**. Tese (Doutorado) Universidade Duisburg-Essen. [S.l.], p. 231. 2007.
- LAARIBI, A. **SIG et analyse multicritères**. Paris: Hermes, 2000.
- LAM, K. P. et al. **COMPARATIVE STUDY OF SKY LUMINANCE MODELS IN THE TROPICAL CONTEXT**. IBPSA. Praga: [s.n.]. 1997.
- LAMAS, J. M. G. **Morfologia urbana e desenho da cidade**. 12. ed. Lisboa: [s.n.], v. 1, 2009.
- LAMM, L. O. A new analytic expression for the equation of time. **Sola Energy**, 26, 1981.
- LANDSBERG, H. E. **The urban climate**. New York,: Academic Press, v. 28, 1981.
- LECHETA, E. M. **Algoritmos Genéticos para Planejamento em Inteligência Artificial**. Tese (Doutorado em Informática). Curso de Pós-Graduação em Informática. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2004.
- LECHNER, N. **Heating, Cooling, Lighting – Design Methods for Architects**. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- LECLERCQ, L. **Modélisation dynamique du trafic et applications à l'estimation du bruit routier**. Tese (Doutorado em Engenharia), LICIT. [S.l.], p. 310. 2002.
- LEIRAS, A. Otimização de Parâmetros de um Algoritmo Genético. **RICA - Revista de Inteligência Computacional Aplicada**, v. 6, p. 1-7, 2010.
- LEVY, A. **La qualité de la forme urbaine problématique et enjeux I**. Ministère de l'Équipement et des Transport - Secrétariat Permanent du Plan Urbain. Paris, p. 157. 1992.
- LIMA, H. G.; ASSIS, E. A. **Building mass calculation using GIS software for climate responsible urban planning applications**. The 20th Conference on Passive Low Energy Architecture - PLEA. Santiago: [s.n.]. 2003.
- LINS, R. D. B. et al. **Vazios urbanos: entendendo as especificidades territoriais e ambientais das terras sem ocupação do litoral norte da cidade de Maceió, Alagoas, Brasil**. IV Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável - PLURIS 2010. Faro, Portugal: [s.n.]. 2010.
- LINS, R. D.; ZACARIAS, P.; SCOTT, C. **A UTILIZAÇÃO DE SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NO MAPEAMENTO DOS VAZIOS URBANOS DO "LITORAL NORTE" DA CIDADE DE MACEIÓ, ALAGOAS**. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, PE, Brasil: [s.n.]. 2008. p. 1-4.
- LOBACCARO, G. et al. District geometry simulation: a study for the optimization of solar façades in urban canopy layers. **Energy Procedia**, v. 30, p. 1163 – 1172, 2012.
- LONG, N.; KERGMARD, C. Classification morphologique du tissu urbain pour des applications climatologiques, Cas de Marseille. **Revue Internationale de Géomatique**, v. X, p. 1-27, 2005.
- LOUAIL, T. **Comparer les morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis par la simulation à base d'agents – Approches multi-niveaux et environnements de simulation spatiale**. Tese (Doutorado em Sciences Fondamentales et Appliquées), Université d'Évry-Val-d'Essonne, U.F.R.. Evry, França, p. 233. 2010.

- LOWRY, W. P. Empirical estimation of the urban effects on climate: A problem analysis. **J. Appl. Meteorol.**, 16, 1977. 129-135.
- LUCAS, D. C. **Algoritmos Genéticos: uma Introdução**. Apostila de curso Ferramentas de Inteligência Artificial. [S.l.]. 2002.
- LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J. **The atmosphere**. 7. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1998.
- LUZ, B. et al. **Céu Artificial Retilíneo a FAU-USP: Desenvolvimento e Construção de Equipamento para Aplicação Didática**. NUTAU - 7º Seminário Internacional Espaço Sustentável Inovações e Edifícios e Cidades. São Paulo: USP. 2008.
- MAÍZIA, M. et al. **Energy requirements of characteristic urban blocks**. CISBAT 2009-Renewables in a changing climate-From Nano to urban scale. [S.l.]: [s.n.]. 2009.
- MAÍZIA, M. L. U. E. L. M. D. V. **Les annales de la recherche urbaine, n°103, septembre 2007, pp.79-85.**, n. n°103, septembre 2007, pp.79-85., p. 79-85, 2007.
- MAGNIER, L.; HAGHIGHAT, F. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network.. **Building and Environment**, v. 45, p. 739-746, 2010.
- MAITELLI, G. T.; SOUZA, S. C.; PINHO, J. G. **THE MAGNITUDE OF URBAN HEAT ISLAND IN THE TROPICAL CONTINENTAL AREAS IN BRAZIL**. ICUC5. Lodz: [s.n.]. 2005.
- MAITELLI, G. T.; WRIGHT, I. R. The climate of a riverside city in the Amazon Basin: urban-rural differences in temperature and humidity. **Amazonian deforestation and climate**, 1996. 1-14.
- MAIZIA, M. et al. **Energy requirements of characteristic urban blocks**. Proceedings of CISBAT 2009 - Renewables in a changing climate-From Nano to urban scale. Lausanne, Suisse: EPFL. 2009. p. 1-6.
- MARDALJEVIC, J. Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. **Lighting Research and Technology**, 27, n. 4, 1995. 181-188.
- MARIOLLE, B. L'espace anthropologique D comme Densité. **Les Cahiers de la recherche architecturale et urbaine**, v. 1, p. 64-67, 2007.
- MARIQUE, A. F. Ç.; REITER, S. A method for evaluating transport energy consumption in suburban areas. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 1, n. 33, p. 1-6, 2012.
- MARKS, W. Multicriteria optimisation of shape of energy-saving buildings. **Buildings and Environment**, v. 4, p. 331-339, 1997.
- MARLER, R. T.; ARORA, J. S. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 41, n. 6, p. 853-862, 2010.
- MARRY, S. **Densité urbaine et qualité de vie. En quoi la compréhension des représentations de la densité urbaine est-elle prépondérante dans l'analyse et la conception de formes urbaines propices à une certaine qualité de vie ?** Prix Étudiant EpE-Metro 2009, Densité urbaine et qualité de vie : comment mieux faire ?. Grenoble, p. 28. 2009.
- MARSH, A. **Non-uniformity in incident solar radiation over the facades of high-rise buildings**. PLEA - Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven: [s.n.]. 2004. p. 1-6.
- MARTIN CENTRE, F. S. G. R. T. V. R. **Towards zero emissions urban development**. University of Cambridge. Cambridge. 1997.
- MARTIN, L.; MARCH, L. **Urban Space and Structures**. 1. ed. Cambridge: University Press, v. 1, 1972.
- MARTINS, T. A. L.; ADOLPHE, L.; KRAUSE, C. B. **Microclimate Effects of Urban Geometry on Outdoor Thermal Comfort in the Brazilian Tropical Semi-arid Climate**. PLEA - 28th Passive Low Energy Architecture Conference. Lima: PUC-Lima. 2012.

- MASSON, V. et al. Modélisation urbaine et stratégies d'adaptation au changement climatique pour anticiper la demande et la production énergétique (MUSCADE). **Références**, v. 1, n. La modélisation intégrée de la ville, p. 174-184, Setembro 2012.
- MAUGARD, A. **Regards sur le bâtiment: Le futur en construction**. Paris: Editions Le Moniteur, 2007.
- MENDLER, S.; ODELL, W. **The HOK Guidebook to Sustainable Design**. New York: Éditions John Wiley & Sons, 2001.
- MENDONÇA, R. S. R.; ASSIS, E. S. Conforto térmico urbano: estudo de caso do bairro Floresta de Belo Horizonte. **Ambiente Construído (online)**, v. 3, n. 3, 2003.
- MESSAOUD, B. O. **Approche physico-morphologique de l'albédo effectif. Vers une stratégie de formes et de matériaux urbains**. Dissertação (Mestrado em Sciences et Techniques des Environnements), École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. Nantes, França, p. 205. 2009.
- MESTAYER, P. G.; ANQUETIN, S. **climatology of cities**. In 3 on Air Pollution, Air Pollution 95. [S.l.]: [s.n.]. 1994.
- MESTAYER, P. G.; DURAND, P.; AUGUSTIN, P. The urban boundary-layer field campaign in marseille (ubl/cluescompte): set-up and first results. **Boundary-Layer Meteorology**, 114, n. 2, 2005. 315-365.
- METEOFRANCE. **Comprendre la météo - glossaire**. Metofrance. Toulouse. 2011.
- MICHALSKY, J. J. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050). **Solar Energy**, 40, n. 3, 1988. 227-235.
- MICHELE. nh. **zsdfasf**, p. asd, ad.
- MILES, J. C.; SISK, G. M.; MOORE, C. J. The conceptual design of commercial buildings using a genetic algorithm. **Computer and Structures**, v. 79, n. 17, p. 1583-1592, 2001.
- MINDLIN, H. E. **Arquitetura moderna no Brasil**. Rio de Janeiro: Aeroplano, v. 1, 1999.
- MODEFRONTIER. **The Multi-objective Optimization and Design Environment. Versão 4.4.1**. ESSS / ESTECO. [S.l.]. 2013.
- MOLION, L. C. B. Considerações sobre o aquecimento global antropogênico. **Instituto de Ciências Atmosféricas, Departamento de Meteorologia.**, Maceió, v. 1, 2008.
- MOLLE, N. **Étude Théorique et Expérimentale du Comportement Thermique de l'Habitat en Milieu Tropical Humide**, Thèse de doctorat, École Central des Arts et Manufactures. Paris. 1984.
- MONTAVON, M. **Optimisation of Urban Form by the Evaluation of the Solar Potential**. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. 2010.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiment**. 5. Ed. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2001.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4 Ed. ed. Rio de Janeiro,: LTC, 2009.
- MOON, P.; SPENCER, D. E. Illumination from a non-uniform sky. **Illuminating Engineering**, 37, n. 10, 1942. 707-726.
- MORELLO, E.; RATTI, C. Sunscapes: 'Solar envelopes' and the analysis of urban DEM. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 33, p. 26-34, 2009.
- MOUDON, A. V. Urban morphology as an emerging disciplinary field. **Urban Morphology Review**, 1997.
- MOULINIÉ, C.; NAUDIN-ADAM, M. **Appréhender la densité 2 - Les indicateurs de densité (Understanding density 2 - Indicators of density)**. Note rapide sur l'occupation du sol. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France. Paris. 2005.
- NAJJAR, G. et al. **Bilans radiatif et 331 International version 1 - 6 Apr 2010 d'énergie dans un canyon urbain**. Association Internationale de Climatologie. [S.l.]: [s.n.]. 2005.

- NAKAMURA, Y.; OKE, T. R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. **Atmospheric Environment**, 22, n. 12, 1988. 2691-2700.
- NEWMAN, P.; KENWORTHY, J. **Cities and automobile dependence, an international sourcebook**. Aldershot, Reino Unido: Gower Technical Editions, 1989.
- NIEMASZ, J.; SARGENT, J.; REINHART, C. F. **Solar zoning and energy in detached residential dwellings”, in Attar Ramtin**. SimAUD 2010 - Simulation for Architecture and Urban Design. Boston, MA, USA: [s.n.]. 2011. p. 105-113.
- NIEUWOLT, S. The urban microclimate of Singapore.. **Journal of Tropical Geography** , 22, 1966. 30–37.
- NIJKAMP, P.; RIETVELD, P.; VOODG, H. **Multicriteria evaluation in physical planning**. North-Holland: [s.n.], 1990.
- NORDPIL. Nordpil. **World database of large urban areas, 1950-2050**, 2007. Disponível em: <<http://nordpil.com/go/resources/world-database-of-large-cities/>>. Acesso em: 15 dezembro 2013.
- NUNEZ, M.; OKE, T. R. The energy balance of an urban canyon. **Journal of Applied climatology**, 16, n. 1, 1977.
- OKE, T. R. **Overview of interactions between settlements and their environments**. WMO experts meeting on Urban and building climatology. Genève: WMO. 1982.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 1. ed. Londres: Routledge, 1987.
- OKE, T. R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103-113, 1988.
- OKE, T. R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and Observing Methods**. WMO/TD. [S.l.]. 2006. (81).
- OLIVEIRA, L. S. **Uma Contribuição ao Estudo dos Métodos de Otimização Multi-objetivo**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG. 2005.
- PAIO, A.; TURKIENICZ, B. An Urban Grammar Study: A Geometric Method for Generating Planimetric Proportional and Symmetrical Systems. **Nexus Network Journal**, Turin, v. 13, n. 1, p. 151–169, 2011.
- PANAO, M. J. N. O.; GONÇALVES, H. J. P.; FERRÃO, P. M. C. Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach. **Renewable Energy**, v. 33, p. 887–896, 2008.
- PANERAI, P.; DEPAULE, J.-C.; DEMORGON, M. **Analyse urbaine**. 4. ed. Marseille: Paranthèses, v. 1, 2009.
- PARKER, D. C.; EVANS, T. P.; MERETSKY, V. M. **easuring emergent properties of agent-based landuse/ landcover models using spatial metrics**. Seventh annual conference of the international society for computational economics. [S.l.]: [s.n.]. 2001.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Update world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2007. 1633-1644.
- PEREIRA, F. . N. C. **Proposta sistemática de uso em planejamento urbano do envelope solar como forma de controle da ocupação do solo urbano em função da**. ENCAC - ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Salvador, Bahia, Brasil: [s.n.]. 1997. p. 1-10.
- PEREZ, D. R. C. **O envelope solar e o direito ao sol**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas.. Campinas, São Paulo. 2007.
- PEREZ, R. et al. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. **Solar Energy**, 39, n. 3, 1987. 221-231.
- PEREZ, R. et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, 44, n. 5, 1990. 271-289.
- PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution - preliminary configuration and validation. **Solar Energy**, 50, n. 3, 1993. 235-243.

- PERRIN DE BRICHAMBAUT, C. **Estimation des ressources énergétiques solaires en France**. Paris: Edition Européennes Thermique et Industrie, v. 1, 1996.
- PICCOLI, B.; TOSIN, A. Time-evolving measures and macroscopic modeling of pedestrian flow'. **Archive for rational mechanics and analysis**, v. 199, n. 3, p. 707-738, 2011.
- PINHO, A. F.; MONTEVECHI, J. A. B.; MARINS, F. A. S. Análise da Aplicação de Projeto de Experimentos nos Parâmetros dos Algoritmos Genéticos. **Sistema e Gestão**, v. 2, n. 3, p. 319-331, 2007.
- PMM. **Zoneamento de uso do solo urbano de Maceió**. Prefeitura Municipal de Maceió-AL. Maceió. 2007.
- POMEROL, J. C.; BARBA-ROMERO, S. **Choix multicritère dans l'entreprise - principe et pratique**. Paris: Hermes, 1993.
- RAMOS, G.; GHISI, E. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. **Ambiente Construído**, 10, n. 2, jun 2010. 157-169.
- RAO, S. S. **Engineering Optimization: Theory and Practice**. 1. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2009.
- RAPOPORT, A. **House form and culture (Foundations of Cultural Geography Series)**. New Jersey: Éditions Prentice Hall, v. 1, 1969. 150 p.
- RAPOPORT, A. **Pour une anthropologie de la maison**. Paris: Éditions Dunod, v. 1, 1972. 207 p.
- RASHEED, A. **Multiscale Modelling of Urban Climate**. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. 2009.
- RATTI, C. A. R. P. Urban texture analysis with image processing techniques. In: AUGENBROE, G.; EASTMAN, C. **Computers in Building: Proceedings of CAAD Futures 99**. Boston: Kluwer Academic, v. 1, 1999. p. 49-64.
- RATTI, C.; BAKER, N.; STEEMERS, K. Energy consumption and urban texture. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 7, p. 762-776, 2005.
- RATTI, C.; RAYDAN, D.; STEEMERS, K. "Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. **Energy and Buildings**, v. 35, p. 49-59, 2003.
- RATTI, C.; RICHENS, P. Raster Analysis of Urban Form.. **Environment and Planning B: Planning and Design**, 31, 2004. 297-309.
- RAYNAUD, D. **Forme urbaine: une notion exemplaire du point de vue de l'épistémologie des sciences sociales**. Actes du Colloque LOUEST. Paris: [s.n.]. 1999. p. 1-23.
- REINDL, D. T.; BECKMANN, W. A.; DUFFIE, J. A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. **Solar Energy**, 45, n. 1, 1990. 9-17.
- REINHART, C. F.; HERKEL, S. The simulation of annual daylight illuminance distributions - a state-of-the-art comparison of six Radiance-based methods. **Energy and Buildings**, 32, 2000. 167-187.
- RICHENS, P. **Image processing for urban scale environmental modelling**. IBPSA. Praga: [s.n.]. 1997.
- RINGENBACH, N. **Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg**. Strasbourg I. [S.l.], p. 167. 2004.
- ROBINSON, D. Urban Morphology and indicators of radiation availability.. **International Journal of Solar Energy**, 80, n. 12, 2006. 1643-1648.
- ROBINSON, D. **Computer modelling for sustainable urban design**. Londres: Earthscan, v. 1, 2011.
- ROBINSON, D.; STONE, A. Solar radiation modeling in the urban context. **Solar Energy**, 77, n. 3, 2004. 295-309.
- RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 2a Ed. ed. Campinas: Cárita editora, v. 1, 2009.

- RODRIGUES, M. R. B. **A Forma Urbana em Portugal Continental: Aplicação de Índices Quantitativos na Caracterização Morfológica das Cidades. Dissertação.** Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamento). Universidade de Lisboa. Lisboa. 2009.
- ROGERS, R. **Des villes pour une petite planete.** Paris: Le moniteur Editions, 2000.
- ROSENFELD, A. H.; AKBARI, H.; BRETZ, S. Mitigation of urban heat island : materials, utility programs, updates. **Energy and Buildings**, 22 , 1995. 255-265.
- ROSSI, A. **Arquitetura da cidade.** 2. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.
- ROULET, C. A. et al. A multicriteria rating methodology for buildings. **Building and Environment**, v. 37, p. 579-586, 2002.
- ROUSSEAU, F.; LONG, N.; RENOARD, A. Vers une simulation de l'évolution des structures urbaines à partir d'une modélisation multi-agents.. **Vertigo**, v. 11, n. 3, 2011.
- SAATY, S. A scaling method for priorities in hoerarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, 1977.
- SACRE, C. **Le confort dans les espaces extérieurs: analyse microclimatique.** Nantes: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, division climatologie, 1983. 138 p.
- SALAT, S. **Les et les formes. Sur L'urbanisme durable.** 1. ed. Paris: CSTB, v. 1, 2011.
- SALLEZ, A. **Urbaphobie et désir d'urbain, au péril de la ville.** La ville mal aimée, Colloque au château de Cerisy-la-Salle. [S.l.]: [s.n.]. 2007. p. 12.
- SAMPAIO, P. R. **Teoria, Métodos e Aplicações de Otimização Multiobjetivo.** Tese (Doutorado em Matemática). Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.
- SANTAMOURIS, M. **Energy and climate in the urban built environment.** Londres: James and James, 2001. 402 p.
- SANTAMOURIS, M. **Passive cooling of buildings.** London: James and James Science Publishers, 2005.
- SCHAFFER, J. D. **Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms.** Dissertação. Vanderbilt University. [S.l.]. 1984.
- SCHAFFLER, S.; SCHULTZ, R.; WEINZIERL, K. Stochastic method for the solution of unconstrained vector optimization problems. **Journal of Optimization Theory and Application**, v. 114, n. 1, p. 209–220, 2002.
- SCUESSEL, M. C. B.; SATTLER, M. A. Cidades em (trans)formação: impacto da verticalização e densificação na qualidade do espaço residencial. **Ambiente Construído (online)**, Porto Alegre, RS, Brasil, v. 10, n. 3, p. 137-150, Jul/Set 2010.
- SHARLIG, A. **Décider sur plusieurs critères: panorama de l'aide à la décision multicritère.** Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes , 1995.
- SHELTON, T. **Reconciling housing density and housing diversity in inner ring neighbourhoods.** PLEA 2008 Proceedings, 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Dublin: [s.n.]. 2008. p. 6.
- SKARTVEIT, A. et al. On the estimation of atmospheric radiation from surface meteorological data. **Solar Energy**, 56, n. 4, 1996. 349-359.
- SOARES, J. P.; TRAMONTANO, M. Arquitetura emergente, design paramétricos e o representar através de modelos de informação. **Virus (online)**, São Carlos, v. 8, Dezembro 2012.
- SOGA, K.; AKASA, H.; NIMIYA, H. **A COMPARISON OF METHODS TO ESTIMATE HOURLY TOTAL IRRADIATION ON TILTED SURFACES FROM HOURLY GLOBAL IRRADIATION ON A HORIZONTAL SURFACE.** IBPSA. Kyoto: [s.n.]. 1999.

- SOUAMI, T. Conceptions et représentations du territoire énergétique dans les quartiers durables. **Flux**, v. 2, n. 76-77, p. 71-81, 2009.
- SOUZA, L. C. L. et al. Fator de visão so céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. **Ambiente Construído (online)**, v. 10, n. 4, 2010.
- SPENCER, J. W. Fourier series representation of the position of the sun. **Search**, 2, n. 5, 1971. 172.
- SRINIVAS, N.; DEB, K. Multi-objective Function Optimization Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm. **Evolutionary Computation**, v. 2, n. 3, p. 221-248, 1994.
- STANHILL, G.; KALMA, J. D. Solar dimming and urban heating at Hong Kong. **International Journal of Climatology**, 15, n. 8, 1995. 933-941.
- STEEMERS, K. Energy and the city: density, buildings and transport. **Energy and Buildings**, 35, 2003. 3-14.
- STEEMERS, K. et al. City Texture and Microclimate. **Urban Design Studies**, v. 3, p. 25-50, 1997.
- STEINØ, N. **PARAMETRIC THINKING IN URBAN DESIGN: a geometrical approach**. eCAADe 28: Future Cities. Zurich: [s.n.]. 2010. p. 1-8.
- STEWART, I. D.; OKE, T. R. **Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitudie in the canopy layer**. Symposium Eighth Symposium on Urban Environment. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 1-6.
- STEWART, I.; OKE, T. Classifying Urban Climate Field Sites by « Local Climate Zones ». **International Association for Urban Climate**, v. 1, p. 1-10, 2009.
- TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, 25, n. 2, 1997(a). 99-103.
- TAN, K. C.; LEE, T. H.; KHOR, E. F. Evolutionary Algorithms for Multi-Objective Optimization: Performance Assessments and Comparisons.. **Artificial Intelligence Review** , v. 17, p. 253-290, 2002.
- TELLER, J. **Spherical instrumentation for the urban morphology analysis**. 21st Urban Data Management Symposium. Venice-Italy: [s.n.]. 1999.
- TELLER, J.; AZAR, S. Townscope II - a computer rendering system to support solar access decision making. **Solar Energy**, 70, n. 3, 2001. 187-200.
- THIBERGE, C. **La ville en creux**. Paris: Editions du Linteau, 2002.
- TIMMIS, J. **Artificial Immune Systems: a Novel Data Analysis Technique Inspired by the Immune Network Theory**. Tese de Doutorado. University of Wales. Aberystwyth, Reino Unido. 2000.
- TIWARI, P.; PARIKH, J. Cost of CO 2 reduction in building construction. **J. Energy**, n. 20, 1994. 531-547.
- TORRENS, P. M.; ALBERTI, M. **Measuring Sprawl**. Center for Advanced Spatial Analysis. University College. Londres. 2000. (27).
- TORRES, S. **Arranjos Construtivos Urbanos: Um Estudo sobre a Influência da Configuração de Conjuntos Habitacionais Verticais na Qualidade Térmica de Edificações em Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, Brasil, p. 180. 2006.
- TRAISSNEL, J.-P. **Cours Urbanisme et énergie - quartiers durable**. Institut Français d'Urbanisme. Paris. 2006.
- TREGENZA, P. R. Subdivision of sky hemisphere for luminance measurements. **Lighting Research and Technology**, 19, 1987. 13-14.
- TREGENZA, P.; SHARPLES, S. **Daylighting algorithms**. ETSU. [S.l.]. 1993.
- UN. **World Urbanization Prospects: The 2003 Revision**. United Nations. [S.l.]. 2004.

- UNSWORTH, H. M.; MONTEIGH, J. L. Longwave radiation at the ground - I. Angular distribution of incoming radiation. **Q. J. R. Met. Soc.**, 101, 1975. 13-24.
- VETTORATO, D.; GENELETTI, D.; ZAMBELLI, P. Spatial comparison of renewable energy supply and energy demand for low-carbon settlements. **Cities**, 28, n. 6, 2011. 557-566.
- VIANNA, H. D.; POUHEY, M. T. F. **Montagem e teste de um simulador físico de insolação - Heliodon - a ser usado como recurso diático no ensino de conforto térmico para edificações agrícolas**. CIC - XV Congresso de Iniciação Científica. Pelotas: UFPEL. 2006.
- VINCKE, P. **L'Aide multicritère à la décision**. Bruxelles: Editions de l'Université de Bruxelles, 1989.
- VITRUVÉ. **Les dix livres d'Architecture**. Paris: Errance, v. 1, 2006. 159 p.
- WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth**. Gabriola Island, BC: New Society Publishers, 1996.
- WADDELL, P.; ULFARSSON, G. Introduction to Urban Simulation: Design and Development of Operational Models. In: STOPHER, P. R.; BUTTON, K. J.; KINGSLEY **Handbook in Transport, Volume 5: Transport Geography and Spatial Systems**. [S.l.]: Éditions Pergamon Press, 2004. p. 203-236.
- WALRAVEN, R. Calculation the position of the sun. **Solar Energy**, 20, n. 5, 1978. 393-397.
- WANG, B. Estimation of wind energy over roof of two perpendicular buildings. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics (trabalho em processo de avaliação)**, 2013.
- WARD, L. G.; SHAKESPEARE, R. **Rendering with Radiance - The Art and Science of Lighting Visualisation**. San Francisco: Morgan Kaufmann, v. 1, 1997.
- WASSERMAN, P. **Neural Computing Theory and Practice**. Nova York, EUA: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- WETTER, M.; WRIGHT, J. A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization. **Building and Environment**, v. 39, p. 989-999, 2004.
- WHILLIER, A. Calculating the position of the sun. **Solar Energy**, 20, n. 5, 1978. 393-397.
- WRIGHT, J. A.; LOOSEMORE, H. A.; FARMANI, R. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 9, p. 959-972, 2002.
- WRIGHT, J.; PEREZ, R.; MICHALSKY, J. J. Luminous efficacy of direct irradiance variations with insolation and moisture conditions.. **Solar Energy**, 42, n. 5, 1989. 387- 394.
- YU, H. S. **Parametric architecture: performative/responsive assembly compon**. Massachusetts Institute of Technology. Boston, p. 126. 2009.
- ZELLNER, P. **Hybrid space: New forms in digital architecture**. Londres: Thames and Hudson, 1999.
- ZITZLER, E.; DEB, K.; THIELER, L. Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: empirical results.. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation** , v. 8, p. 173-95, 2000.
- ZITZLER, E.; THIELE, L. Multi-Objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 3, n. 4, p. 257-271, 1999.
- ZUNINO, G. et al. **Densité :opérations de logements et quartiers urbains**.. Rapport d'études, IAURIF. Paris, p. 94. 2009.

ANNEXE 1 – Liste des Publications

Publications dans des revues internationales

1. MARTINS, T. A. L. ; ADOLPHE, L. ; BASTOS, L.E.G. From solar constraints to urban design opportunities : optimization of urban typologies in a tropical city in Brazil. *Energy and Buildings*. V. 76, p. 43-56, Junho de 2014.
2. MARTINS, T. A. L., BONHOMME, M., ADOLPHE, L. Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL. *Ambiente Construído* (Online). v.13, p.213 - 233, Dezembro de 2013.

Publications dans des conférences internationales

1. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BONHOMME, M. Building energy demand based on urban morphology analysis. Case study in Maceió, Brazil In: *Passive and Low Energy Architecture, 2013, Munich. Sustainable Architecture for renewable future.* , 2013. v.1. p.1-6.
2. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BASTOS, L. E. G. Avaliação preliminar do potencial solar em classes morfológicas urbanas de referência de Maceió-AL. In: *Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído.*, 2013, Brasília. Conforto e Projeto. ANTAC, 2013. v.1. p.1 – 10.
3. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Análise de sensibilidade sobre o impacto da geometria urbana no conforto térmico exterior em clima tropical In: *Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído.*, 2013, Brasília. Conforto e Projeto. ANTAC, 2013. v.1. p.1-10.
4. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Efeitos do uso de galerias urbanas no conforto térmico exterior em clima tropical semiárido In: *ENTAC, 2012, Juiz de Fora - MG. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.* Juiz de Fora: UFJF, 2012. v.1. p.1- 10.
5. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Microclimate Effects of Urban Geometry on Outdoor Thermal Comfort in the Brazilian Tropical Semi-arid Climate In: *PLEA - Passive and Low Energy Architecture, 2012, Lima. Opportunities, limits and needs.* Lima: PUC Lima, 2012. v.1. p.1 – 6.
6. NIEMEYER, M. L. A., MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L. Towards Sustainable Urban Planning for Brazilian Cities: A Knowledge-base to Integrate Environmental Predictive Data into a DSS In: *INCOM, 2012, Bucarest. Information Control Problems in Manufacturing.* Bucarest: ELSEVIER, 2012. v.1. p.1 – 6.
7. MARTINS, T. A. L., ADOLPHE, L., BARROSO-KRAUSE, C. M. L. Influence of Urban Geometry on Outdoor Thermal Comfort in Tropical Climate In: *Climate and Construction, 2011, Karlshure. Climate and Construction.* Karlshure: KIT, 2011. v.1. p.1- 6.