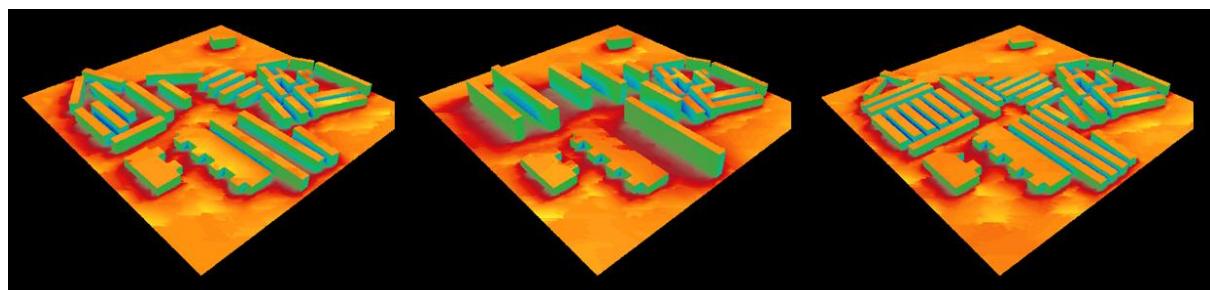


# SIMULATION URBAINE D'UN QUARTIER DE LOGEMENT SOCIAL À BOGOTÁ, COLOMBIE

Étude de l'influence de la densité urbaine sur le comportement  
thermique dynamique intérieur des bâtiments.



Andrea Cifuentes Cuéllar  
Responsable : Dr Jérôme Kämpf  
**MAI 2012**

## RESUME

Les dynamiques démographiques et la grande pauvreté dans les pays en développement comportent la nécessité urgente de fournir des logements à faible coût aux personnes les plus pauvres qui habitent dans les régions urbaines. En Colombie, le développement des quartiers de logement social est caractérisé par deux déficits, un quantitatif (lié à la densité urbaine) et un autre qualitatif (liée aux conditions intérieures des bâtiments), il est donc impératif d'identifier des solutions qui peuvent nous conduire à la mise en œuvre de quartiers de logement social plus durables.

Ce document étudie la relation entre la densité urbaine et les conditions thermiques intérieures des bâtiments à l'aide d'un simulateur des flux énergétiques en milieu urbain. L'étude comprend la vérification du modèle thermique pour les simulations, la définition d'un indicateur d'inconfort thermique et finalement, des simulations d'un quartier de logements sociaux à Bogotá, la capitale de Colombie. Les résultats montrent qu'il est possible de maintenir la même densité humaine et d'améliorer le comportement thermique de l'ensemble urbain en utilisant un bas coefficient d'occupation de sol avec des bâtiments plus élevés. Cela peut fournir aux architectes et aménageurs urbains des indications utiles pour améliorer la planification des logements sociaux en Colombie.

## LISTE DE FIGURES

Figure 1 Megacities 2010 [2].....	9
Figure 2 Cité Ouvrière Noisiel 1874 [5] – Modèle de Cité Jardin, Ebenezer Howard [7] – Modèle de logement massif, Plan de masse de la cité de Sotteville-lès-Rouen [8] .....	10
Figure 3 Beddington - BedZED, Grande-Bretagne- Quartier à échelle humaine avec mixité social (propose accès à la propriété pour des familles aux revenus modestes)[6].....	10
Figure 4 Macro-projet de logement social dans la périphérie de Ciudad de Mexico [10] .....	11
Figure 5 Quartier Villa Javier (Phase hygiéniste) [11] Centre Urbaine Antonio Nariño (Phase institutionnelle) [12] Tunal experimental (Transition)[13].....	11
Figure 6 Localisation macro-projet Ciudad Verde, Bogotá, Colombia[16] .....	12
Figure 7 Critères de Développement Durable – SIA [20] .....	13
Figure 8 14 Cibles Environnementales HQE [20] .....	14
Figure 9 Quartiers sélectionnés par ARENE [21] .....	14
Figure 10 Paramètres d'étude Quartiers Durables [6] .....	15
Figure 11 Représentation COS [22]      Figure 12 Représentation CUS [22] .....	17
Figure 13 Parcelles au même CUS avec des différents effets du bâti (source : ASPAN) .....	17
Figure 14 Valeurs pour l'interpolation .....	20
Figure 15 Résultats de Température et du Rayonnement Horizontal (diffus et direct) pour Bogotá .....	21
Figure 16 Visualisation de données climatiques de Bogotá sur LESOSAI .....	23
Figure 17 Valeurs modifiés dans les fichiers climats .....	24
Figure 18 Nouveau fichier climat pour CitySim, Bogotá_LESOSAI.cli – Valeurs modifiées.....	25
Figure 19 Fichier Bogotá_LESOSAI – Valeurs de G_h .....	26
Figure 20 Résultats des simulations d'Onde Courte - Igh .....	26
Figure 21 Localisation du bâtiment – LESOSAI .....	27
Figure 22 Localisation du batiment - CITYSIM .....	27
Figure 23 Plan original bâtiment type.....	28
Figure 24 Forme original – Forme simplifié – PLAN .....	28
Figure 25 Forme original – Forme simplifié – COUPE .....	28
Figure 26 valeurs géométriques du bâtiment – LESOSAI.....	29
Figure 27 Valeurs géométriques du bâtiment – CITYSIM .....	30
Figure 28 Facteur de réflexion et d'absorption des différents types de matériaux [33] .....	31
Figure 29 Detaille Plafond .....	32
Figure 30 Paramètres Plafond – LESOSAI.....	32
Figure 31 Paramètres Plafond – CITYSIM .....	33
Figure 32 Detaille Plancher .....	33
Figure 33 Paramètres Plancher - LESOSAI .....	34
Figure 34 Paramètres Plancher - CITYSIM .....	34
Figure 35 Façade Est et Ouest – Detaille paroi .....	35
Figure 36 Paramètres Façades Est et Ouest - LESOSAI .....	36
Figure 37 Paramètres façade Est et Ouest - CITYSIM .....	36
Figure 38 Façade Nord et Sud – Detaille paroi .....	37
Figure 39 Spécifications du verre – Catalogue GUARDIAN.....	38
Figure 40 Données Générales Fenêtre Façade Nord et Sud - LESOSAI.....	39
Figure 41 Dimensions surface vitrée façades Nord et Sud .....	39

Figure 42 Fraction ombrée fenêtres Façades Nord et Sud - LESOSAI.....	40
Figure 43 Paramètres fenêtres Façades Nord et Sud - CITYSIM .....	41
Figure 44 Désactivation de stores - LESOSAI .....	41
Figure 45 Désactivation de stores dans le fichier .xml - CITYSIM .....	42
Figure 46 Eclairement énergétique direct normal, Bogotá – Source données MeteoNorm .....	42
Figure 47 Données Générales, Capacité Thermique LESOSAI.....	45
Figure 48 Taux d'occupation par les personnes d'un séjour chambre à coucher .....	46
Figure 49 Taux d'utilisation d'éclairage .....	47
Figure 50 Taux d'utilisation des appareils .....	47
Figure 51 Vue en plan – Étage type bâtiment.....	48
Figure 52 Donnés Générales Local – Personnes - LESOSAI .....	49
Figure 53Taux d'occupation horaire - LESOSAI.....	50
Figure 54 Taux d'utilisation des appareils .....	51
Figure 55 Profiles d'occupation Personnes + Appareils + Éclairage / Profil d'occupation Total ..	53
Figure 56 Profil Library Window - CITYSIM.....	54
Figure 57 Fichier .xml Occupants - CitySim .....	54
Figure 58 Donnée générales pour le local .....	55
Figure 59 Résultats Chauffage et Refroidissement - LESOSAI .....	55
Figure 60 Fichier .xml – Heat Source - CITYSIM.....	56
Figure 61 Fichier TH.out - Résultats de VdotVent – Tmin=-30.....	56
Figure 62 Fichier TH.out – Résultats VdotVent – Tmin=40.....	57
Figure 63 Fichier YearlyResults.out - Résultats Chauffage et Refroidissement - CITYSIM .....	57
Figure 64 Ventilation Zone Chauffée – LESOSAI.....	58
Figure 65 Ratio d'infiltration – CITYSIM .....	59
Figure 66 Températures résultantes 21 – 24 juin - Capacité Thermique.....	62
Figure 67 Températures résultantes 21 – 24 juin - Émissivité et Absorption .....	62
Figure 68 Températures résultantes 21 – 24 juin – Ratio d'Infiltration .....	63
Figure 69 Fraction Ombrée de 50%.....	63
Figure 70 Températures résultantes 21 – 24 juin – Gains Solaires Surfaces Vitrées – Fraction Ombrée.....	64
Figure 71 Températures résultantes 21 – 24 juin – Personnes.....	64
Figure 72 Températures résultantes 21 – 24 juin – Appareils .....	65
Figure 73 Températures résultantes 21 – 24 juin – Eclairage .....	65
Figure 74 Apports thermiques 21 – 24 juin – Gains Solaires – Gains Internes .....	66
Figure 75 Températures résultantes 21 – 24 juin – Occupation.....	66
Figure 76 Comparaison 1.....	67
Figure 77 Effet de la température du sol.....	68
Figure 78 Effet Profondeur de pénétration.....	69
Figure 79 Effet des occupants.....	70
Figure 80 Effet des appareils.....	70
Figure 81 Effet de l'éclairage.....	71
Figure 82 Effet des occupants, appareils et éclairage dans les températures internes.....	71
Figure 83 Calcul de distribution finale – Profil d'occupation finale avec la modification.....	74
Figure 84 Fichier .xml – Nouveaux occupants et profile pour CitySim.....	74
Figure 85 Occupation Totale avec modification des occupants .....	74
Figure 86 Charte bioclimatique de Givoni pour Bogotá [33].....	75
Figure 87 Résultats Humidité relative intérieure dans le modèle simulé.....	77

Figure 88 Premiers 4 jours de l'année – Dégrées heure pour chauffage et refroidissement hypothétiques.....	78
Figure 89 Echelle Dégrées-Heure – Indicateur d'inconfort.....	78
Figure 90 Localisation Las Huertas .....	79
Figure 91 Macro-projet Las Huertas .....	80
Figure 92 Etapes Las Huertas .....	80
Figure 93 Cas d'étude – 3 lots macro-projet Las Huertas .....	81
Figure 94 Comparaison de différentes densités humaines de quartiers de Lausanne [36] .....	81
Figure 95 Représentation 3D et 2D de 3 cas d'étude .....	82
Figure 96 Énumération de bâtiments dans – Exemple cas 1 .....	83
Figure 97 Obstruction Verticale et Horizontale [23] .....	83
Figure 98 Cas 1 : Obstructions horizontales (Plan) – Obstructions verticales (Elévation).....	84
Figure 99 Cas2 : Obstructions horizontales (Plan) – Obstructions verticales (Elévation).....	84
Figure 100 Cas3 : Obstructions horizontales (Plan) – Obstructions verticales (Elévation) .....	85
Figure 101 Résultats Cas 1 – sans occupants .....	86
Figure 102 Ciel Cumulé pour Bogotá en vue hémisphérique – Image réalisée avec le logiciel RADIANCE.....	87
Figure 103 Résultats Cas 2 – sans occupants .....	87
Figure 104 Résultats Cas 3 – sans occupants .....	88
Figure 105 Comparaison 3 cas d'étude – Valeurs moyennes de DH Sans Occupation.....	89
Figure 106 Comparaison 3 cas d'étude – Valeurs moyennes de DH Avec Occupants .....	89
Figure 107 Comparaison 3 cas d'étude – Image de synthèse RADIANCE.....	91

## LISTE DE TABLES

Table 1 Paramètres Localisation .....	27
Table 2 Paramètres géométrie bâtiment .....	29
Table 3 Paramètres physiques de surfaces .....	30
Table 4 Paramètres Plafond .....	32
Table 5 Paramètres Plancher .....	33
Table 6 Paramètres façades Est et Ouest .....	35
Table 7 Façades Nord et Sud .....	37
Table 8 Propriétés pour calculer k .....	43
Table 9 Capacité Thermique estimée selon différentes types de constructions .....	44
Table 10 Paramètres éléments de construction - calcul de la capacité thermique .....	44
Table 11 Calcul Capacité Thermique des Murs .....	45
Table 12 Calcul Capacité Thermique Bâtiment .....	45
Table 13 Activité des personnes (P : personne) .....	46
Table 14 Calcul énergie d'occupants selon distribution de présence .....	50
Table 15 Calcul énergie des appareils selon taux d'utilisation .....	51
Table 16 Calcul énergie d'éclairage selon taux d'utilisation .....	52
Table 17 Calcul Profil d'Occupation total .....	53
Table 18 Résumé des paramètres bâtiment .....	59
Table 19 Résumé paramètres surfaces .....	60
Table 20 Simulations Paramètres plus influents - LESOSAI .....	61
Table 21 Simulations Paramètres pour CitySim - Interlogiciel .....	67
Table 22 Modification Fichier Climatique .....	68
Table 23 Comparaison de Gains Internes – LESOSAI - CitySim .....	72
Table 24 Modification Occupants pour CitySim – Personnes .....	72
Table 25 Modification Occupants pour CitySim – Appareils .....	73
Table 26 Modification Occupants pour CitySim – Éclairage .....	73
Table 27 Paramètres de densité case de référence .....	81
Table 28 Paramètres de densité de trois cas d'étude .....	82

## LISTE D'EQUATIONS

Equation 1 Résistance Thermique .....	30
Equation 2 Coefficient de transmission thermique .....	31
Equation 3 Réflectance d'onde courtes murs.....	31
Equation 4 Kgroun.....	34
Equation 5 Valeur-G CitySim.....	40
Equation 6 Capacité Thermique pour une Couche.....	43
Equation 7 Capacité Thermique Bâtiment .....	44
Equation 8 Dégagement total de chaleur - CitySim .....	48
Equation 9 Quantité d'occupants pour LESOSAI.....	49
Equation 10 Énergie Occupants selon distribution de présence .....	50
Equation 11 Énergie appareils selon taux d'utilisation .....	51
Equation 12 Énergie éclairage selon taux d'utilisation .....	52
Equation 13 Calcul pour profile d'occupation total .....	52
Equation 14 Rapport d'infiltration de (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) à (V/h).....	58
Equation 15 Profondeur de Pénétration .....	69
Equation 16 Pression de vapeur d'eau à saturation.....	76
Equation 17 Humidité absolue à la saturation de vapeur.....	76
Equation 18 Humidité absolue .....	76
Equation 19 Humidité Relative intérieure .....	77
Equation 20 Dégrées Heure pour chauffage et refroidissement.....	77

# TABLE DES MATIERES

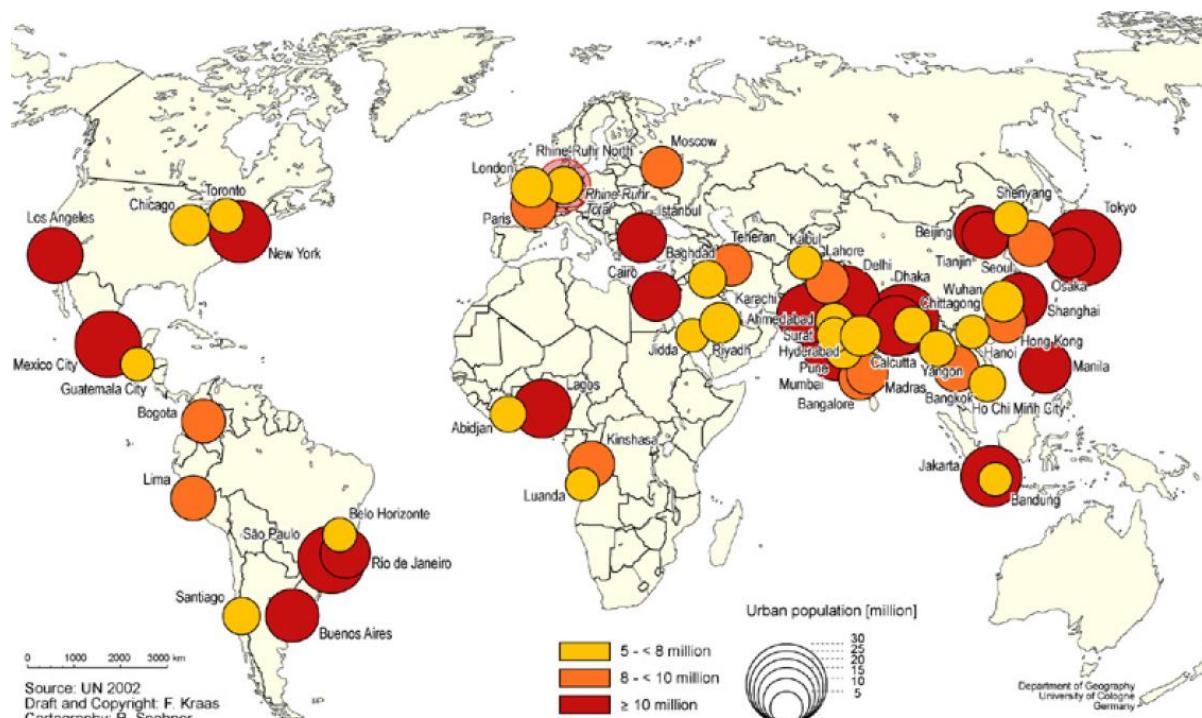
Résumé .....	1
Liste de Figures .....	2
Liste de Tables .....	5
Liste d'Equations .....	6
Table des Matières .....	7
1.0 INTRODUCTION .....	9
1.1. PROBLÈME .....	9
Macro-Projets de Logement Social .....	12
Le déficit quantitatif en Colombie .....	12
Le déficit qualitatif en Colombie .....	12
Quartiers de Logement Social et Durabilité .....	13
1.2. DÉLIMITATION DU PROBLÈME .....	16
Densité Urbaine .....	16
Bien Être des Habitants – Confort .....	17
1.3. OBJECTIF .....	18
1.4. MÉTHODOLOGIE .....	18
Simulation Energétique – CITYSIM .....	18
Étapes .....	19
2.0 COMPARAISON INTER-LOGICIELS .....	20
2.1 Acquisition de Données .....	20
2.1.1. Données météorologiques Bogotá .....	20
2.1.2. Données Géométriques et Physiques du Bâtiment .....	27
2.1.3. Capacité Thermique du Bâtiment .....	43
2.1.4. Profil d'Occupation Horaire .....	45
2.1.5. Besoins de Refroidissement et de Chauffage .....	54
2.1.6. Ratio d'Infiltration .....	57
2.2 Simulations des Paramètres du Modèle - LESOSAI .....	60
2.2.1. Capacité Thermique .....	61
2.2.2. Emissivité et Coefficient d'absorption .....	62
2.2.3. Taux d'infiltration .....	63
2.2.4. Fraction Ombrée .....	63
2.2.5. Personnes .....	64
2.2.6. Appareils .....	65

2.2.7. Eclairage.....	65
2.2.8. Gains Solaires et Internes .....	66
2.2.9. Courbes de Reference pour CitySim.....	66
2.3 Calibration du Solveur CitySim .....	67
2.3.1. Simulations avec occupants.....	70
3.0 INDICATEUR D'INCONFORT THERMIQUE .....	75
Vérification de l'Humidité Relative Intérieure.....	76
Température Intérieure – Indicateur .....	77
4.0 CAS D'ÉTUDE.....	79
4.1. Contexte du Projet.....	79
4.2. Densités Urbaines – 3 Cas d'Étude.....	81
4.2.1. Obstructions horizontales et verticales .....	83
5.0 RESULTATS DE SIMULATIONS .....	86
5.1. Cas d'étude 1 – COS 0.30 .....	86
5.2. Cas d'étude 2 – COS 0.15 .....	87
5.3. Cas d'étude 3 – COS 0.46.....	88
5.4. Comparaison de 3 cas d'étude - sans occupation .....	88
5.5. Comparaison de 3 cas d'étude - avec occupation.....	89
6.0 CONCLUSIONS.....	90
6.1. Recommandations pratiques.....	90
6.2. Prochaines Étapes .....	91
7.0 REMERCIEMENTS .....	92
BIBLIOGRAPHIE .....	92

# 1.0 INTRODUCTION

## 1.1. PROBLÈME

En 1990, dans le monde, d'un total de 35 villes avec une population de plus de 5 millions d'habitants, 22 appartenaient à des pays en voie de développement[1]. Actuellement il y a 23 métropoles qui comptent une population de plus de 10 millions (Figure 1), et pour le 2025 on prévoit que la population humaine, rien que dans les pays en voie de développement, aura augmenté à 2000 millions de personnes [1]. Vue cette dynamique démographique et en tenant compte des taux importants de pauvreté dans le Tiers Monde, il est clair qu'un des défis les plus importants auxquels font face les pays en développement dans le XXI<sup>ème</sup> siècle, est celui de fournir des logements à leurs habitants, principalement à ceux qui n'ont pas un pouvoir d'achat suffisant pour acquérir leur propre toit. Par conséquent, dans le Tiers Monde, le développement adéquat du logement social s'avère urgent.



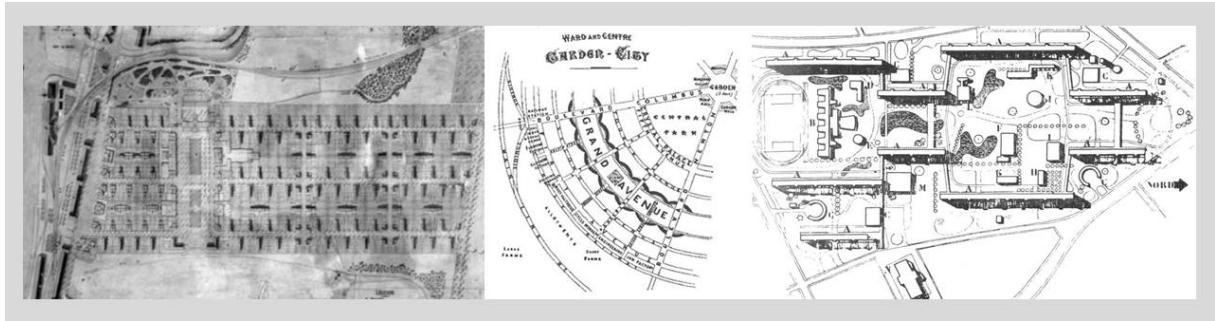
**23 Metropolises now have a population exceeding 10Million...**

Figure 1 Megacities 2010 [2]

A savoir, le LOGEMENT SOCIAL est défini comme toute demeure fournie à ceux qui ne peuvent pas avoir leur propre toit [3], c'est-à-dire, un logement souvent à très bas coût destiné aux personnes pauvres. En Colombie le coût maximal d'un logement social est équivalent à 135 SMLMV (Salaire Minimum Légal Mensuel en Vigueur 535.000 pesos COL = USD 282) c'est-à-dire USD 38.056[4]

En EUROPE, la préoccupation d'assurer un logement aux personnes à revenu modeste est née au XIX<sup>ème</sup> siècle avec la croissance urbaine que la révolution industrielle a comporté. Avec le passage du temps, les propositions urbaines de logement social ont varié et évolué en fonction

des besoins de chaque époque. Maintenant après les Quartiers Ouvrières du XIXème siècle, des Citées Jardin hygiénistes du début du XXème siècle et des modèles urbains de logement massif des années 50s (Figure 2), le logement social en Europe a atteint un stade de développement durable (Figure 3) qui cherche à récupérer des modèles urbaines fondées sur des échelles plus humaines et avec des morphologies plus traditionnelles [5]; ces modèles assurent également la création d'une communauté socialement inclusive, équilibrée en termes d'âge, de revenus économiques et d'origine ethnique en fournissant des logements de différentes tailles à divers degrés de subvention [6].



**Figure 2 Cité Ouvrière Noisiel 1874 [5] – Modèle de Cité Jardin, Ebenezer Howard [7] – Modèle de logement massif, Plan de masse de la cité de Sotteville-lès-Rouen [8]**



**Figure 3 Beddington - BedZED, Grande-Bretagne- Quartier à échelle humaine avec mixité social (propose accès à la propriété pour des familles aux revenus modestes)[6]**

Le logement social en AMÉRIQUE LATINE est né en réponse à la croissance alarmante de la population entraînée par le développement industriel du début du XXe siècle. L'évolution des modèles urbains présente des similitudes avec celle de l'Europe, en tenant compte que des propositions hygiénistes et des logements massifs en hauteur [9] ont été également proposées. Cependant, aujourd'hui dû aux déficits de logement élevés de la plupart de villes latino-américaines, les grandes capitales comme Ciudad de Mexico (Figure 4), Santiago de Chile et Bogotá se développent disproportionnellement au-delà de leurs périphéries métropolitaines avec macro-projets résidentiels (voir Figure 4) de grande surface et haut nombres de logements. Au contraire des éco-quartiers européens (Figure 3) le modèle urbain de macro-projet n'est pas à une échelle humaine, et ne promeut pas la mixité sociale (il est entièrement proposé pour les classes sociales les plus pauvres).



Figure 4 Macro-projet de logement social dans la périphérie de Ciudad de Mexico [10]

Dans le cas spécifique de la COLOMBIE peuvent être clairement identifiés 5 étapes qui mettent en évidence les changements majeurs dans la production et la gestion du logement social[11] :

- Phase 1 : 1918-1942 Hygiéniste
- Phase 2: 1942-1965 Institutionnelle
- Phase 3: 1965-1972 Transition
- Phase 4: 1972-1990 Corporative
- Phase 5: 1991-Actualité Subvention de la demande

La phase hygiéniste a été caractérisée par la construction de quartiers avec des logements unifamiliaux dans la périphérie des villes ; pendant la phase institutionnelle la typologie architectonique préférée a été les projets multifamiliaux en hauteur. Pendant la phase de transition des projets expérimentaux intéressants ont été produits, mais ils ne répondaient pas aux exigences de densité nécessaire de l'époque, de sorte que dans l'étape corporative la typologie de modèle multifamilial en hauteur a été reprise.

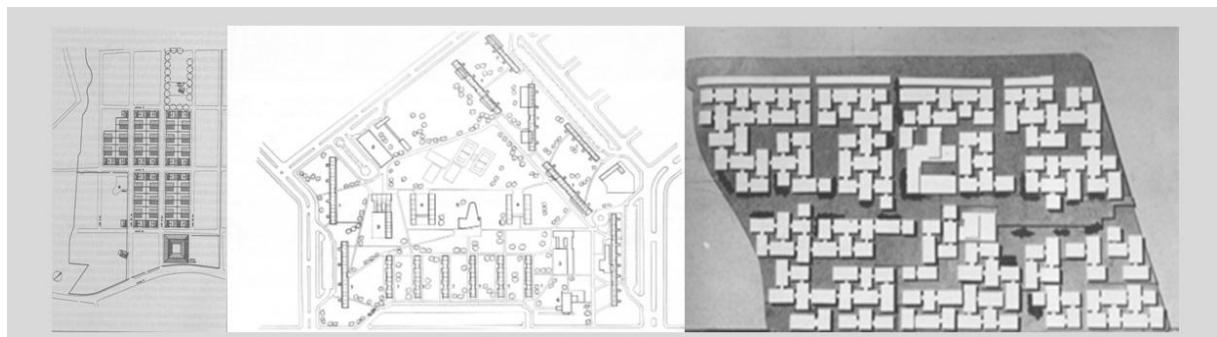


Figure 5 Quartier Villa Javier (Phase hygiéniste) [11] Centre Urbaine Antonio Nariño (Phase institutionnelle) [12] Tunal experimental (Transition)[13]

Actuellement, la Colombie n'est pas étrangère aux tendances alarmantes de la croissance démographique dans le monde en développement, montrant un taux élevé de **déficit quantitatif** de logements[14]. Les politiques de logement de la nation se concentrent exclusivement sur la réduction de ce déficit, comportant l'élaboration de **macro-projets** qui encouragent la surexploitation des terres disponibles [12] et qui, en outre, produisent des

logements avec un considérable **déficit qualitatif** affectant le bien-être des habitants en termes de confort [15]. Il est donc nécessaire d'identifier des solutions qui nous amènent vers des quartiers de logement social durables en Colombie.



Figure 6 Localisation macro-projet Ciudad Verde, Bogotá, Colombie[16]

#### *MACRO-PROJETS DE LOGEMENT SOCIAL*

Sont définis comme un ensemble de décisions administratives et d'actuations urbanistiques adoptées par le Gouvernement National, utilisant des outils d'aménagement territorial, de financement et de gestion de sol pour mettre en œuvre une opération à grande échelle qui cherche à habiliter le sol pour bâtir de grands projets de logement social reliés à des services publics, des réseaux des transports, des espaces publics et des équipements collectifs. [17]

#### *LE DEFICIT QUANTITATIF EN COLOMBIE*

On peut définir le déficit quantitatif comme un rapport un à un entre les logements existants et les familles qui ont besoin de logement, c'est-à-dire, il est basé sur la comparaison entre le nombre de familles et le nombre de logements existantes. La différence entre le nombre de familles et le nombre d'hébergements existants est défini comme déficit quantitatif.[14] En Colombie, selon le recensement de 2005[18] 34% de familles manquent d'un abri. A Bogotá, la capitale, 15% des familles n'ont pas de demeure.

#### *LE DÉFICIT QUALITATIF EN COLOMBIE*

Ce déficit fait référence aux logements qui présentent des déficiences par rapport aux matériaux (plancher, parois, toiture), à l'espace (entassement), à la disponibilité des services publics, et à la qualité de l'environnement intérieur.[14]

Les problèmes basiques qualitatifs de la plupart des logements sociaux se rapportent à l'insuffisance de ventilation et de lumière naturelle [15] et le manque de caractéristiques physiques-spatiales adaptées au climat et aux déterminantes socio-culturelles de chaque région de la Colombie [19]. Il est évident qu'un déficit qualitatif dans le logement porte préjudice au bien-être des occupants en réduisant la qualité de vie et le confort.

## QUARTIERS DE LOGEMENT SOCIAL ET DURABILITE

Dans les pays développés divers indicateurs de durabilité (sociétaux, économiques et environnementaux) sont pris en compte au moment d'évaluer la qualité des quartiers.

Au CANADA cinq indicateurs sont considérés dans le cadre de l'outil d'évaluation Green Building Challenge : contexte, utilisation des ressources, charge environnementale, qualité de l'environnement intérieur et longévité de la construction.

Aux ETATS UNIS le système d'évaluation des bâtiments durables LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) définit des indicateurs sur la base des critères suivants :

1. SITE : Localisation, densité, accessibilité.
2. GESTION DE L'EAU : Eaux de surface, traitement des eaux usées, réduction des besoins.
3. ENERGIE ET ATMOSPHERE : Amélioration des performances, énergies renouvelables, couche d'ozone.
4. MATERIAUX ET RESSOURCES : Matériaux locaux, recyclage, bois certifié, gestion de déchets.
5. QUALITE DE L'ENVIRONNEMENT INTERIEUR : Efficacité de la ventilation, matériaux à faible émission, confort thermique.
6. CONCEPT INNOVANTE

En SUISSE les normes de la SIA (Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes) tiennent compte de divers critères de développement durable par rapport à l'économie, la société et l'écologie des quartiers et des bâtiments (voir Figure 7).

Economie			
Substance du bâtiment	Coûts d'acquisition	Coûts d'exploitation et d'entretien	Flexibilité
Substance construite	Prix du bâtiment	Coût total optimum	Système constructif
Site	Prix du terrain	Coûts d'exploitation	Changement d'affectation
Programme des locaux	Frais financiers	Coûts d'entretien	Interchangeabilité des éléments
Qualité d'équipement	Coûts externes	Coûts externes	

Société			
Bien être	Utilisation	Esthétique	Collectivité
Sécurité	Fonctionnalité	Aménagements intérieurs	Offres dans le voisinage
Climat intérieur	Flexibilité, utilisation individualisée	Aménagements extérieurs	Espaces semi-publics
Lumière, bruit, rayonnement	Préservation de la sphère privée	Espaces extérieurs	Espaces publics
Polluants, odeurs		Impression d'ensemble	Coexistence
			Participation

Ecologie			
Matériaux	Energie	Sol / Paysage	Infrastructures
Matériaux non polluants	Energie de construction et d'entretien	Surface / Sol	Transports
Ressources renouvelables	Energie d'exploitation	Paysage	Déchets ménagers
Déchets de construction	Potentiel d'optimisation	Aménagement des alentours	Eau / Eaux usées
Recyclage des matériaux	Recours aux énergies renouvelables	Gestion de l'eau	
Provenance / exploitation			

Figure 7 Critères de Développement Durable – SIA [20]

En FRANCE l'indicateur HQE (Haute Qualité Environnementale) évalue 14 cibles qui cherchent à limiter les impacts sur l'environnement et à offrir également un environnement intérieur sain dans les bâtiments (Figure 8).

<b>Limiter les impacts sur l'environnement</b>	<b>Offrir un environnement intérieur sain</b>
<b>ECO-CONSTRUCTION</b>	<b>CONFORT</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relation avec l'environnement immédiat</li> <li>• Choix des matériaux</li> <li>• Chantier à faible nuisance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confort hygrothermique</li> <li>• Confort acoustique</li> <li>• Confort visuel</li> <li>• Confort olfactif</li> </ul>
<b>ECO-GESTION</b>	<b>SANTE</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestion de l'énergie</li> <li>• Gestion de l'eau</li> <li>• Gestion des déchets</li> <li>• Gestion de l'entretien et de la maintenance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité sanitaire des espaces</li> <li>• Qualité de l'air intérieur</li> <li>• Qualité de l'eau</li> </ul>

Figure 8 14 Cibles Environnementales HQE [20]

Cette démarche est applicable aux bâtiments et à leur environnement proche, par ailleurs les 14 cibles définies par la HQE sont essentiellement à dominante environnementale. Les volets concernant les déplacements, l'équilibre, la cohérence et la mixité dans les domaines sociaux et économiques sont insuffisamment développés pour la mise en œuvre d'un aménagement urbain durable cohérent. Ce mouvement prometteur est donc encore incomplet et un travail d'adaptation aux thèmes de l'urbanisme doit être effectué afin qu'il devienne opérationnel [21].

Avec le but de repérer et de présenter des exemples concrets de réalisations urbaines pour clarifier les concepts et fournir des références de bonnes pratiques qui peuvent être reproductibles et adaptables aux spécificités de la région Ile-de-France, en avril 2005 l'Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Énergies de l'Ile-de-France, a publié la GUIDE D'EXPERIENCES EUROPÉENNES DE QUARTIERS DURABLES

Le guide présente six quartiers (voir Figure 9) sélectionnés selon leur capacité d'intégrer des composants du développement durable (préservation de l'environnement, efficience économique, équité sociale et valorisation culturelle) et de s'appuyer sur une forte pratique de gouvernance à toutes les phases du projet.

Opérations Quartier Ville - Pays	Type d'aménagement			Nombre d'habitants	Nombre de logements	Surface du site
	Nouveau quartier	Réhabili- tation	Nature du site et localisation			
BedZED Beddington Royaume-uni	✓		Ancien site houiller	244 (février 2002)	82	1,7 ha
Bo01 Malmö Suède	✓		Polder, proximité du centre ville, ancienne friche industrielle Exposition européenne de bâtiment "City of Tomorrow" (2001)	10 000 résidents	800	12 ha
Vesterbro Copenhague Danemark		✓	Quartier ancien au sud ouest de la ville, proche de la gare centrale	34 000 habitants	4 000	35 ha
Vauban Fribourg Allemagne	✓ avec rénovation d'anciens bâtiments		Ancien site des casernes de l'armée française, à 3 km du centre ville (écrin de verdure : arbres centenaires)	3 600 en 2004	420 1 <sup>re</sup> tranche	38 ha
Kronsberg Hanovre Allemagne	✓		Ancien site industriel, périphérie de la ville au sud est. Site de l'Exposition Universelle 2000	6 300 résidents 2 500 employés A terme : 15 000	2 200 logements 300 maisons individuelles en bande 500 logements HLM A terme : 6 000	70 ha construits (150 ha)
Hammarby Sjöstad Stockholm Suède	✓		Ancien site portuaire et industriel, à proximité du centre ville. Réserve naturelle 1990 - Candidature de Stockholm aux jeux olympiques 2004	15 000 résidents 8 000 employés 2010 : 30 000	8 000	200 ha

Figure 9 Quartiers sélectionnés par ARENE [21]

Les indicateurs les plus pertinents de la performance de la plupart des quartiers étudiés dans le guide ont été résumés par [6] dans le tableau suivant:

Paramètre	BedZED	Vauban	Bo01	Hamarby
Surface de l'intervention	1,7	38	22	200
Coefficient d'Occupation du Sol	0,35	0,17	0,18	0,18
Coefficient d'Utilisation du Sol	0,82	1,51	1,96	2,35
Nombre de logements	250	2000	1303	11000
Mixité social délibérée	+	++	-	0
Participation de la communauté	+	++	0	0
Critères d'évaluation (concurrence)	++	+	++	+
Tracé du site (rayonnement solaire)	++	++	0	+
Consommation énergétique				
Thermique	48	n/a	167	n/a
Électrique	34,4	n/a	118	n/a
Système de conversion d'énergie installé. Capacité (MW) ou surface (m <sup>2</sup> )				
Panneau photovoltaïques	772 m <sup>2</sup>	2500 m <sup>2</sup>	120 m <sup>2</sup>	oui*
Collecteurs solaires thermiques	non	oui	1400 m <sup>2</sup>	390 m <sup>2</sup>
Éolienne	non	non	2 MW	non
Pompe à chaleur (géothermie)	non	non	1,2 MW	non
Chauffage urbain	oui	oui	oui	oui
Climatisation urbaine	non	oui	oui	oui
Biomasse	0,13 MW *	oui	oui	oui
Approvisionnement d'énergie annuel	88 MWh	n/a	6305 MWh	n/a
Dispositifs d'épargne d'eau	++	+	0	0
Consommation d'eau (lts/pers/jour)	72	115	200	150
Recollection de l'eau de pluie	+	+	+	++
Traitement des eaux usées	++	0	++	++
Tri de déchets	+	0	++	++
Matériaux recyclés	++	+	+	+
Matériaux à énergie grise réduite	++	0	+	++
Covoiturage	0	++	0	+
Priorité aux piétons	++	++	+	0
Intégration du système de transport	+	+	0	++
Services et installations	0	++	+	++
Biodiversité et espaces verts	0	++	++	+
Suivi de la performance	++	0	++	0

Figure 10 Paramètres d'étude Quartiers Durables [6]

Le guide [21] conclut que l'approche de la durabilité d'un quartier est définie par sa capacité de prendre en compte l'ensemble des aspects environnementaux, économiques et sociaux du lieu, raison pour laquelle jusqu'à présent tout aménagement urbain durable n'a pas répondu à une méthodologie ou une normalisation stricte, vu que l'histoire de chaque quartier durable lui est propre.

Par conséquence, pour identifier des solutions qui nous amènent vers des quartiers de logement social durables en Colombie, il est d'abord important de tenir compte des aspects sociaux, économiques et environnementaux liés au sujet de logement des pauvres dans le pays, et également d'identifier les critères et indicateurs de durabilité qui peuvent être appliqués.

## 1.2. DÉLIMITATION DU PROBLÈME

Comme écrit si dessus, dans le cas de la Colombie, le phénomène du logement social a été caractérisé par deux déficits majeurs qui répondent aux dynamiques sociaux et économiques du pays: d'un côté le déficit quantitatif, qui comporte le développement des quartiers de logement social à haute densité (macro-projets), et d'autre coté un déficit qualitatif élevé qui affecte le bien-être des habitants en termes de confort.

Or, pour identifier des solutions vers des quartiers sociaux durables en Colombie, il semble nécessaire d'étudier le problème de la DENSITÉ URBAINE lié au BIEN-ÊTRE des habitants, les indicateurs de durabilité qui seront étudiés seront donc la DENSITE et le CONFORT INTERIEUR des bâtiments.

### *DENSITE URBAINE*

La question de la densité renvoie à une réflexion plus globale sur l'environnement urbain et la capacité foncière. Une conception urbaine environnementale durable s'appuie sur des notions de ville "à courtes distances" ou ville "compacte". En effet, un quartier durable correspond souvent à l'idée de village urbain qui inclut des **densités élevées**, des **mixités d'usages** et de fonctions en lien avec l'accessibilité et la reconnaissance de la rue comme élément structurant et d'animation. Ce modèle suppose **une utilisation plus efficace des sols** [21].

Or, la densité représente un seuil de peuplement, un sentiment d'entassement, des données démographiques, un coefficient d'occupation de sols, l'étalement urbaine, etc. Elle peut être observée en termes de :

- Nombre d'habitants, de logements, d'emplois.
- Surface construite
- Activité humaine
- Flux, interactions sociales.
- Equipements, infrastructures, espaces végétalisés

Dans la planification urbaine la densité fait référence surtout aux coefficients d'occupation et d'utilisation du sol (COS-CUS).

COS : Indique la proportion de la surface occupée par les bâtiments sur un terrain donné. Il exprime le rapport entre la surface construite (surface cadastrale) et la surface de toute ou partie de la parcelle comprise dans la zone à bâtir. La surface construite est mesurée par projection sur le plan horizontal de tous les éléments fermés.

CUS (ou IUS) : Coefficient d'utilisation du sol (ou indice d'utilisation du sol), exprime le rapport entre la surface brute de plancher (SBP) habitable et la surface de tout ou partie de la parcelle comprise dans la zone à bâtir.

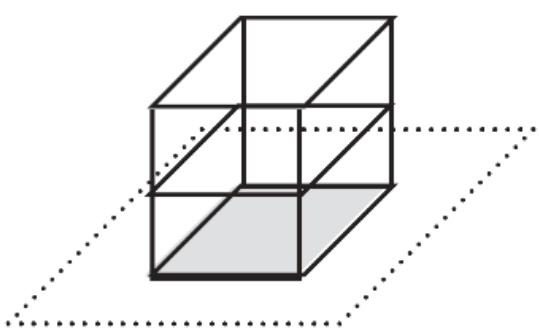


Figure 11 Représentation COS [22]

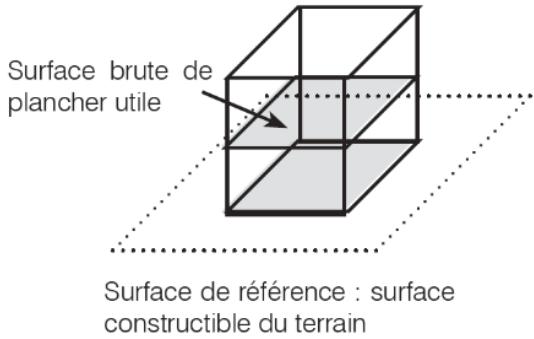


Figure 12 Représentation CUS [22]

La Figure 13 montre comment avec le même CUS et différents COS diverses formes urbaines peuvent être conçues. La relation entre le CUS, le COS et les formes urbaines a été étudiée dans [23] pour évaluer l'influence de la densité urbaine dans le potentiel solaire et l'accès de lumière urbaine (sky-view factor). Pour le problème des logements sociaux en Colombie, nous évaluerons la relation de la densité urbaine avec le bien-être des habitants des bâtiments, ce qui nous permettra de comprendre l'énergétique du bâtiment dans son ensemble, depuis le bâtiment isolé jusqu'à l'ensemble des bâtiments en interaction.

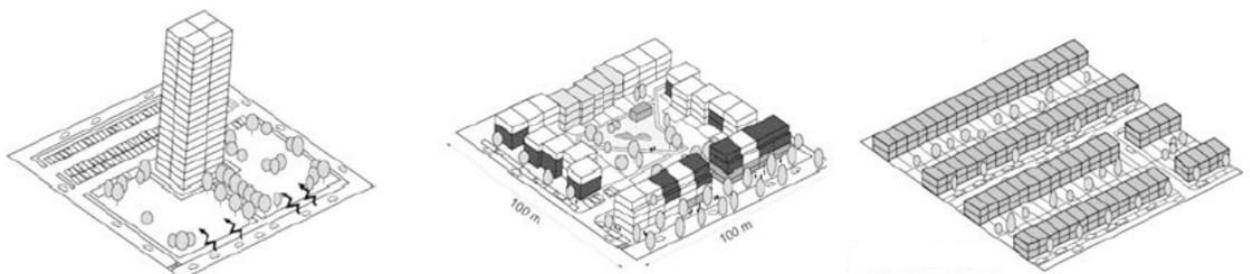


Figure 13 Parcels au même CUS avec des différents effets du bâti (source : ASPAN)

#### *BIEN ÊTRE DES HABITANTS – CONFORT*

Le bien-être est associé au concept de confort, qui est défini par l'ASHRAE comme « l'état d'esprit dans lequel la satisfaction est exprimée avec l'environnement » [24]. Il est mesuré à contrario par le taux d'insatisfaction des occupants. Les conditions propres à l'individu, qui sont métabolisme, son activité, son habillement et sa santé, jouent un rôle primordial sur la perception que cette personne aura de son confort mais sont des paramètres sur lesquels l'architecte n'a aucune influence[25].

Par ailleurs les paramètres suivants, sur lesquels l'architecte peut avoir d'influence interviennent dans le confort.

- Conditions thermiques : température de l'air et des surfaces environnantes, sources de rayonnement, perméabilité thermique des surfaces en contact avec le corps.

- Qualité de l'air : Vitesse relative de l'air par rapport au sujet, humidité relative de l'air, odeurs.
- Acoustique : Niveau de bruit, nuisance acoustique, temps de réverbération.
- Optique : Eclairage naturel et artificiel, couleurs, volumes intérieurs et distribution des volumes.
- Autres : Volume de l'espace, proportions spatiales, forme des limites, aménagement intérieur de mobilier, densité d'occupation de l'espace etc.

La relation entre la densité urbaine et le confort extérieur a été notamment étudié [26, 27], mais des études de la relation entre la densité urbaine et le confort intérieur n'ont pas été retrouvés. Cela peut s'expliquer par le fait que le confort intérieur dans les bâtiments dépend davantage de paramètres liés directement au bâtiment isolé (matériaux, ratio de vitrage, profile d'occupation, dispositifs de climatisation etc.) que de paramètres urbains (orientation, densité, forme urbaine, etc.).

Cependant, concernant le problème des logements sociaux en Colombie, il devient intéressant d'étudier le rapport entre la densité urbaine et le confort intérieur, en raison du fait qu'en Colombie, et plus exactement à Bogotá, les logements sociaux n'utilisent pas de systèmes de chauffage ni de refroidissement pour atteindre des conditions confortables à l'intérieur des bâtiments, et que les matériaux utilisées soient souvent très simples et de bas coût. L'identification des dispositions urbaines qui éventuellement peuvent aider à améliorer les conditions de confort intérieur et le bien-être des occupants est une stratégie de planification qui pourrait comporter des bénéfices économiques, sociaux et environnementaux dans ce type d'ensembles en Colombie.

Finalement l'étude du bien-être des habitants dans le cas spécifique des logements sociaux en Colombie sera focalisée exclusivement sur l'estimation de conditions thermiques internes des bâtiments.

### 1.3. OBJECTIF

L'étude suivante vise à quantifier l'influence de la densité urbaine sur les conditions thermiques internes des logements sociaux à Bogotá, la capitale de Colombie, afin de formuler des recommandations pratiques qui cherchent à améliorer le bien-être des occupants et de faire un pas vers des quartiers de logements sociaux durables dans un pays en voie de développement.

### 1.4. MÉTHODOLOGIE

À partir de la simulation énergétique urbaine d'un quartier de logements sociaux situé à Bogotá, la capitale de Colombie, on espère quantifier l'influence de la densité urbaine sur les conditions thermiques internes des bâtiments.

#### *SIMULATION ENERGETIQUE – CITYSIM*

Pour l'étude, la simulation énergétique urbaine est un outil précieux, car elle permet une évaluation rapide et précise des conditions intérieures des bâtiments associés à différents scénarios urbains. Ces dernières années le Laboratoire d'Energie Solaire et Physique du Bâtiment à l'EPFL a développé le simulateur d'énergie urbaine CITYSIM [28]. Ce dernier est

constitué de plusieurs modèles physiques qui, couplés, peuvent calculer une estimation de la consommation d'énergie sur le site pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage. Un modèle de rayonnement calcule d'abord l'éclairage énergétique incident sur chaque surface de la zone, direct du soleil, diffuse du ciel et réfléchie par les autres surfaces. Les résultats de ce modèle, ainsi que les prédictions de radiation d'onde longue sont entrés dans un modèle thermique déterminant les échanges à travers les enveloppes des bâtiments et calculant les besoins de chauffage et de refroidissement pour maintenir des conditions de température prédefinies à l'intérieur. CitySim est le successeur du logiciel SUNtool, ce logiciel a été développé pour une application allant du bâtiment individuel au quartier, ou encore à une ville. Du point de vue de la consommation d'énergie[29], son but est de tenir compte des principaux phénomènes de transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment en fonction de sa géométrie et de sa construction (radiation, convection, conduction), de considérer l'influence des occupants (comportement, gains internes,...) et également de quantifier l'impact de l'entourage du bâtiment (ombrage d'un bâtiment sur l'autre, obstruction lointaine,...)

Il n'a jamais été utilisé pour étudier des bâtiments sans chauffage ni refroidissement (ce qui est le cas des logements sociaux à Bogotá), mais considérant les caractéristiques du logiciel il est tout à fait possible d'estimer les conditions de température intérieure des bâtiments pour chaque heure de l'année (le comportement thermique dynamique).

## *ÉTAPES*

D'abord, pour gagner confiance par rapport aux résultats de CitySim, la première étape du travail consiste en la vérification du comportement thermique dynamique du modèle à travers une **COMPARAISON INTER-LOGICIELS** avec LESOSAI [30], logiciel utilisé pour la certification et le calcul du bilan thermique dans les bâtiments.

La deuxième étape comprend la **DÉFINITION D'UN INDICATEUR D'INCONFORT THERMIQUE** qui pourrait être facilement calculée avec CitySim pour quantifier l'influence de la densité urbaine sur le comportement thermique des bâtiments.

Finalement à partir de l'analyse des **SIMULATIONS ÉNERGÉTIQUES DU CAS D'ÉTUDE**, on propose des recommandations pratiques vers des quartiers de logement social durables en Colombie.

## 2.0 COMPARAISON INTER-LOGICIELS

Le but de la comparaison inter-logiciels est de gagner confiance par rapport aux résultats de CitySim et de trouver les paramètres qui peuvent nous aider à représenter plus précisément le comportement thermique intérieur des bâtiments. Cela en tenant compte du fait que CitySim est un outil simplifié qui tient compte de quelques paramètres pour les calculs, tandis que LESOSAI permet une plus grande complexité et diversité dans les paramètres d'entrée pour estimer le bilan thermique des bâtiments isolés.

Afin d'acquérir des résultats horaires thermiques pour une période complète d'une année, le calcul dans LESOSAI a été fait basé sur la norme CEN (EN 13790).

Pour la comparaison, un modèle cubique d'un immeuble typique pris d'un quartier de logement social à Bogota a été étudié en utilisant LESOSAI et CitySim, pour voir l'impact de différents paramètres physiques sur les températures internes.

### 2.1 ACQUISITION DE DONNEES

La première étape de cette comparaison est l'acquisition du maximum de données utiles pour la modélisation et la simulation de l'immeuble. Essentiellement on a besoin des données météorologiques de Bogotá, et des données physiques et géométriques du bâtiment.

#### 2.1.1. DONNEES METEOROLOGIQUES BOGOTA

Les données climatiques de Bogotá ont été obtenues de MeteoNorm [31], un logiciel spécialement conçu pour faire des simulations climatologiques pour applications d'énergie solaire passive, active et photovoltaïque.

Bien que les données mesurées reflètent les caractéristiques spécifiques d'un site local, elles font toujours objet d'erreurs de mesure, ces dernières ayant cependant tendance à être compensés par le processus d'interpolation. Les données interpolées doivent être utilisées dans les endroits où il n'y a pas de station météo dans une distance minimum de 20km.

Pour le calcul du climat de Bogotá, MeteoNorm a interpolé les données météorologiques obtenues des trois stations météo les plus proches de Bogotá (voir Figure 14).

METEONORM Version 6.1.0.18

Nom du site = SANTA FE DE BOGOTA CO  
Latitude [°] = 4.630, Longitude [°] = -74.080, Altitude [m] = 2560, Zone climatique = V, 2  
Modèle ravnement = Standard (heure); Modèle température = Standard (heure)  
Modèle ravn. incl. = Perez  
Température: Période nouvelle = 1996-2005  
Rayonnement: Période nouvelle = 1981-2000  
Gh: Seulement 2 station(s) pour l'interpolation  
Ta: Seulement 3 station(s) pour l'interpolation  
Rh: Seulement 3 station(s) pour l'interpolation  
FF: Seulement 4 station(s) pour l'interpolation  
SD: Seulement 1 station(s) pour l'interpolation  
RD: Seulement 2 station(s) pour l'interpolation  
3 stations les plus proches: Gh: Bogota / El-Dorado, Co (10 km), Gaviotas (351 km)  
3 stations les plus proches: Ta: Bogota/Eldorado (12 km), RIONEGRO/JOSE MARI (228 km), Cali/Alfonso Bonill (283 km)

Figure 14 Valeurs pour l'interpolation

Finalement, après l'interpolation nous avons révisé les résultats de température et du rayonnement (Figure 15) obtenus avec MeteoNorm. Les résultats montrent que janvier et décembre sont les mois de l'année dans lesquels il y a le plus d'irradiation solaire, raison pour laquelle ces mois présentent des variations de températures plus considérables. Par ailleurs les températures maximales absolues ne dépassent pas les 25°C, et la température moyenne est estimée de 14.2°C. Ces résultats sont suffisamment proches de la réalité, et par conséquent il est possible de faire des simulations urbaines avec les données obtenus de MeteoNorm.

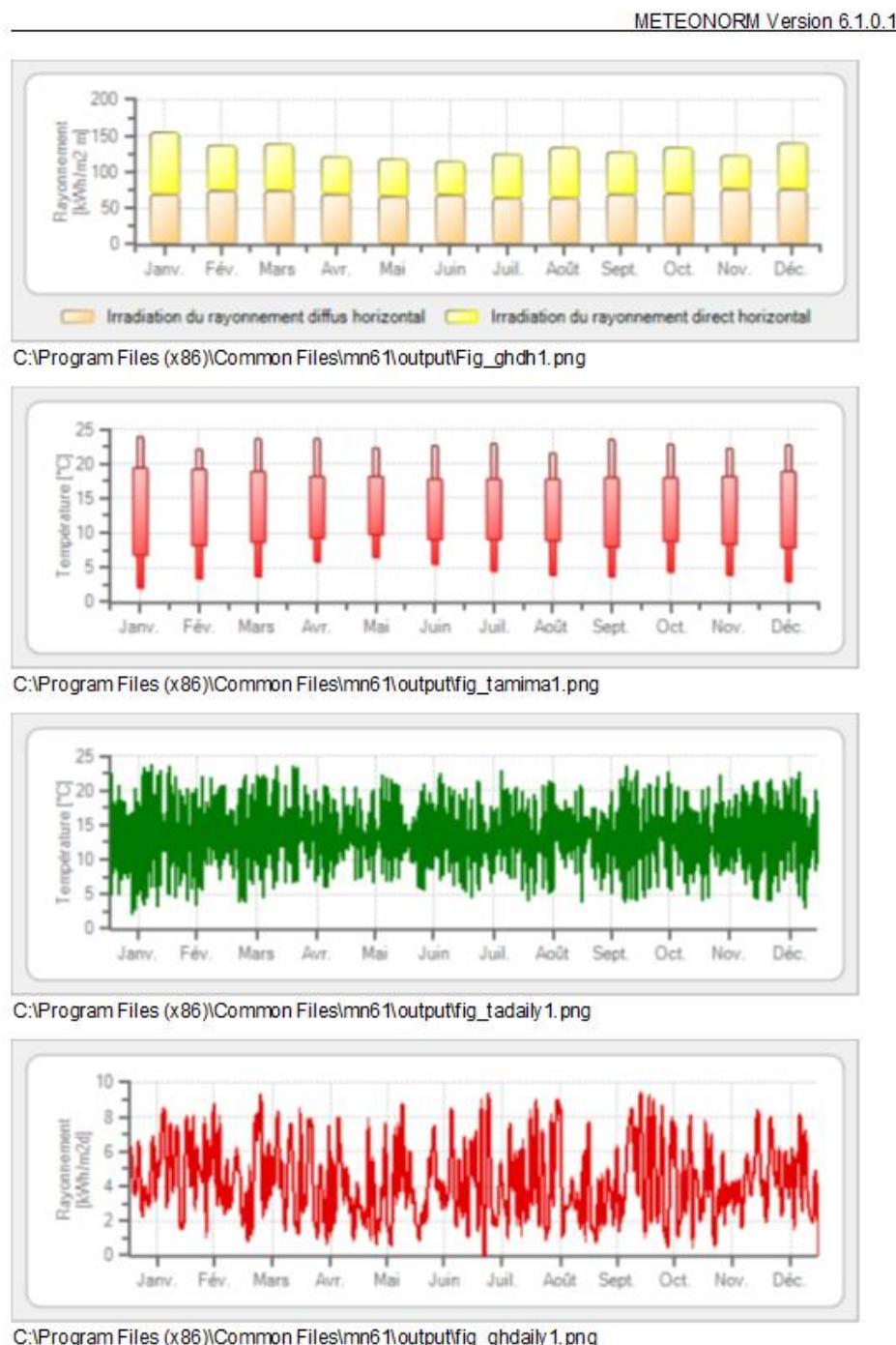


Figure 15 Résultats de Température et du Rayonnement Horizontal (diffus et direct) pour Bogotá

## Fichier Climatique pour CitySim

Le format du fichier climatique comporte une tête qui contient le nom de la ville et sa position géographique. Il définit la latitude, la longitude, l'altitude et le méridien.

Bogota

4.63,-74.08,2560,-5

Chaque fichier contient pareillement les données météorologiques pour une période d'une année, organisées par mois, jour et heure. Il comporte les informations suivantes :

**Tableau 1 Données Météorologiques Fichier Climatique - CitySim**

d	Jour	
m	Mois	
h	Heure	
G_Dh	ECLAIREMENT ENERGETIQUE DIFFUS HORIZONTAL	W/m <sup>2</sup>
G_Bn	ECLAIREMENT ENERGETIQUE DIRECT NORMAL	W/m <sup>2</sup>
Ta	TEMPERATURE DE L'AIR	°C
FF	VITESSE DU VENT	m/s
DD	DIRECTION DU VENT	°
RH	HUMIDITE RELATIVE	%
RR	PRECIPITATIONS	mm
N	NEBULOSITE	(octas)

**Tableau 2 Fichier Climatique Bogotá – Données pour le premier jour de l'année**

Bogotá

4.63,-74.08,2560,-5

dm	m	h	G_Dh	G_Bn	Ta	FF	DD	RH	RR	N	
1	1	1	0	0	5.7	0.5	83	94	0	4	
1	1	2	0	0	5.4	0.3	72	94	0	4	
1	1	3	0	0	5.2	0.3	114	93	0	4	
1	1	4	0	0	5.1	0.5	130	96	0	4	
1	1	5	0	0	4.9	0.3	128	96	0	4	
1	1	6	0	0	4.8	0.5	117	97	0	4	
1	1	7	34	0	5.8	0.3	96	94	0	4	
1	1	8	127	510	9.5	0.9	102	85	0	4	
1	1	9	93	783	12.8	0.7	79	76	0	0	
1	1	10	159	758	15.7	3.4	118	58	0	0	
1	1	11	203	765	18.3	2.7	95	54	0	1	
1	1	12	258	716	20.3	2.7	136	46	0	3	
1	1	13	247	719	21.7	3.4	100	44	0	2	
1	1	14	206	737	22.4	4.1	58	42	0	2	
1	1	15	182	707	22.6	3.1	100	42	0	2	
1	1	16	124	696	21.9	5.1	131	44	0	0	
1	1	17	105	536	20.4	3.1	81	50	0	4	
1	1	18	26	0	18.2	3.6	110	54	0	4	
1	1	19	0	0	17.2	1.9	97	67	0	4	
1	1	20	0	0	16.2	1.6	101	71	0	4	
1	1	21	0	0	15.2	1.3	114	77	0	4	
1	1	22	0	0	14.2	0.5	75	82	0	5	
1	1	23	0	0	13.2	0.2	85	86	0	5	
1	1	24	0	0	12.2	0.2	81	88	0	5	

## Fichier Climatique pour Lesosai

Le format du fichier climatique utilisé par LESOSAI est différent de celui de CitySim. Ce fichier comporte les données météorologiques suivantes pendant chaque heure d'une année complète.

Tableau 3 Données Météorologiques Fichier Climatique - LESOSAI

	Date	
	Jour	
	Heure	
Te	Température extérieure	°C
Xe	Humidité absolue	g de vapeur d'eau/m <sup>3</sup>
SkyTemp	Température du ciel	°C
HGH	ECLAIREMENT ÉNERGÉTIQUE HORIZONTAL	
HGHDiff	ECLAIREMENT ÉNERGÉTIQUE DIFFUS HORIZONTAL	
HGS	HGH Sud	
HGSDiff	HGSDiff Sud	
HGE	HGH Est	
HGEDiff	HGSDiff Est	
HGN	HGH Nord	
HGNDiff	HGSDiff Nord	
HGW	HGH Ouest	
HGWDiff	HGSDiff Ouest	
LWDown		
FF	Vitesse du Vent	m/s

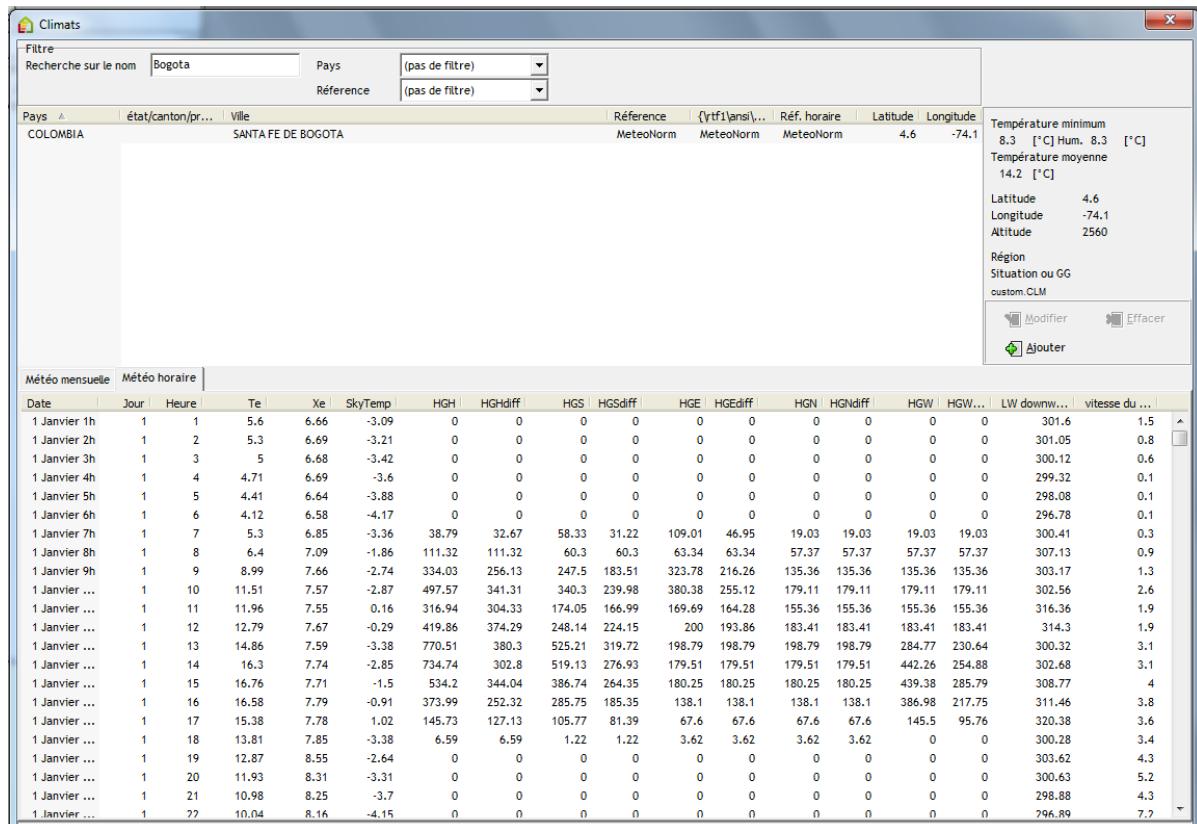


Figure 16 Visualisation de données climatiques de Bogotá sur LESOSAI

## Vérification Fichier Climatique

Pour faire une comparaison inter-logiciels précise avec des données climatiques similaires nous avons fait une légère modification dans les données nécessaires par le solveur de CitySim.

Les valeurs de température extérieure, éclairement énergétique horizontal, et d'éclairement énergétique diffus horizontal ont été extraites des bases de données climatiques de LESOSAI, pour les utiliser dans le fichier climat de CitySim.

Tableau 4 Données climatiques modifiés – Comparaison inter-logiciels

CitySim			Lesosai			Nouveau Fichier Climatique CitySim		
G_Dh	Eclairement énergétique Diffuse Horizontal	HGHDiff	Eclairement énergétique Diffuse Horizontal	G_Dh	Eclairement énergétique Diffuse Horizontal			
G_Bn	Eclairement énergétique Direct Normal	HGH	Eclairement énergétique Global Horizontal	G_h	Eclairement énergétique Global Horizontal			
Ta	Température extérieure	Te	Température extérieure	Ta	Température extérieure			

Climat CitySim

Bogotá											
463,-74,08,2560,5											
dm	m	h	G_Dh	G_Bn	Ta	FF	DD	RH	RR	N	
1	1	1	1	0	5.7	0.5	83	94	0	4	
1	1	1	1	0	5.4	0.3	72	94	0	4	
1	1	1	1	0	5.2	0.3	114	93	0	4	
1	1	1	1	0	5.1	0.5	130	96	0	4	
1	1	1	1	0	4.9	0.3	128	96	0	4	
1	1	1	1	0	4.8	0.5	117	97	0	4	
1	1	1	1	0	5.8	0.3	96	94	0	4	
1	1	1	1	127	510	9.5	0.9	102	85	0	4
1	1	1	1	93	783	12.8	0.7	79	76	0	0
1	1	1	10	159	758	15.7	3.4	118	58	0	0
1	1	1	11	203	765	18.3	2.7	95	54	0	1
1	1	1	12	258	716	20.3	2.7	136	46	0	3
1	1	1	13	247	719	21.7	3.4	100	44	0	2
1	1	1	14	206	737	22.4	4.1	58	42	0	2
1	1	1	15	182	707	22.6	3.1	100	42	0	2
1	1	1	16	124	696	21.9	5.1	131	44	0	0
1	1	1	17	105	536	20.4	3.1	81	50	0	4
1	1	1	18	26	0	18.2	3.6	110	54	0	4
1	1	1	19	0	0	17.2	1.9	97	67	0	4
1	1	20	0	0	16.2	1.6	101	71	0	4	

Climat Lesosai

Météo mensuelle		Météo horaire		Te	Xe	SkyTemp	HGH	HGHDiff	HGS	HGSdiff	HGE	HGEDiff	HGN	HGNdiff	HGW	HGW...	LW downw...	vitesse du ...
Date	Jour	Heure																
1 Janvier 1h	1	1	5.6	6.66	-3.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	301.6	1.5
1 Janvier 2h	1	2	5.3	6.69	-3.21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	301.05	0.8
1 Janvier 3h	1	3	5	6.68	-3.42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300.12	0.6
1 Janvier 4h	1	4	4.71	6.69	-3.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	299.32	0.1
1 Janvier 5h	1	5	4.41	6.64	-3.88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	298.08	0.1
1 Janvier 6h	1	6	4.58	-4.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	296.78	0.1
1 Janvier 7h	1	7	5.3	6.85	-3.36	38.79	32.67	58.33	31.22	109.01	46.95	19.03	19.03	19.03	19.03	300.41	0.3	
1 Janvier 8h	1	8	6.4	7.09	-1.86	111.32	111.32	60.3	60.3	63.34	63.34	57.37	57.37	57.37	57.37	307.13	0.9	
1 Janvier 9h	1	9	8.99	7.66	-2.74	334.03	256.13	247.5	183.51	323.78	216.26	135.36	135.36	135.36	135.36	303.17	1.3	
1 Janvier ...	1	10	11.51	7.57	-2.87	497.57	341.31	340.3	239.98	380.38	255.12	179.11	179.11	179.11	179.11	302.56	2.6	
1 Janvier ...	1	11	11.96	7.55	0.16	316.94	304.33	174.05	166.99	169.69	164.28	155.36	155.36	155.36	155.36	316.36	1.9	
1 Janvier ...	1	12	12.79	7.67	-0.29	419.86	374.29	248.14	224.15	200	193.86	183.41	183.41	183.41	183.41	314.3	1.9	
1 Janvier ...	1	13	14.86	7.59	-3.38	770.51	380.3	525.21	319.72	198.79	198.79	284.77	230.64	300.32	300.32	3.1		
1 Janvier ...	1	14	16.3	7.74	-2.85	734.74	302.8	519.13	276.93	179.51	179.51	442.26	254.88	302.68	302.68	3.1		
1 Janvier ...	1	15	16.76	7.71	-1.5	534.2	344.04	386.74	264.35	180.25	180.25	439.38	285.79	308.77	308.77	4		
1 Janvier ...	1	16	16.58	7.79	-0.91	373.99	252.32	285.75	185.35	138.1	138.1	386.98	217.75	311.46	311.46	3.8		
1 Janvier ...	1	17	15.38	7.78	1.02	145.73	127.13	105.77	81.39	67.6	67.6	67.6	145.5	95.76	320.38	3.6		
1 Janvier ...	1	18	13.81	7.85	-3.38	6.59	6.59	1.22	1.22	3.62	3.62	3.62	0	0	300.28	3.4		
1 Janvier ...	1	19	12.87	8.55	-2.64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	303.62	4.3		
1 Janvier ...	1	20	11.93	8.31	-3.31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300.63	5.2		

Figure 17 Valeurs modifiés dans les fichiers climats

Bogota												
4.63,-74.08,2560,-5												
dm	m	h	G_Dh	G_h	Ta	FF	DD	RH	RR	N		
1	1	1	0	0	5.6	0.5	83	94	0	4		
1	1	2	0	0	5.3	0.3	72	94	0	4		
1	1	3	0	0	5	0.3	114	93	0	4		
1	1	4	0	0	4.71	0.5	130	96	0	4		
1	1	5	0	0	4.41	0.3	128	96	0	4		
1	1	6	0	0	4.12	0.5	117	97	0	4		
1	1	7	32.67	38.79	5.3	0.3	96	94	0	4		
1	1	8	111.32	111.32	6.4	0.9	102	85	0	4		
1	1	9	256.13	334.03	8.99	0.7	79	76	0	0		
1	1	10	341.31	497.57	11.51	3.4	118	58	0	0		
1	1	11	304.33	316.94	11.96	2.7	95	54	0	1		
1	1	12	374.29	419.86	12.79	2.7	136	46	0	3		
1	1	13	380.3	770.51	14.86	3.4	100	44	0	2		
1	1	14	302.8	734.74	16.3	4.1	58	42	0	2		
1	1	15	344.04	534.2	16.76	3.1	100	42	0	2		
1	1	16	252.32	373.99	16.58	5.1	131	44	0	0		
1	1	17	127.13	145.73	15.38	3.1	81	50	0	4		
1	1	18	6.59	6.59	13.81	3.6	110	54	0	4		
1	1	19	0	0	12.87	1.9	97	67	0	4		
1	1	20	0	0	11.93	1.6	101	71	0	4		
1	1	21	0	0	10.98	1.3	114	77	0	4		
1	1	22	0	0	10.04	0.5	75	82	0	5		

Figure 18 Nouveau fichier climat pour CitySim, Bogotá\_LESOSAI.cli – Valeurs modifiées

Sachant que le solveur de CitySim utilise l'éclairement énergétique direct normal et les valeurs d'éclairement énergétique diffus horizontal pour créer une distribution du rayonnement du ciel avec le Perez All-weather modèle, une légère modification dans le code du solveur de CitySim a été faite afin d'accepter les valeurs d'éclairement énergétique global horizontal et diffus horizontal.

Pour vérifier cette modification on a constaté que les valeurs d'éclairement énergétique global horizontal (G\_h) du nouveau fichier climatique, et ceux des résultats de simulations des Ondes Courtes (ShortWave - Igh) étaient les mêmes.

Comme on peut le voir en comparant la Figure 19 et la Figure 20, les valeurs de G\_h et de Igh sont égaux, cependant il y a une petite variation : les valeurs à 7 heures du matin et à 18 h ne sont pas tenues en compte dans les résultats des simulations. Cela s'explique par le fait que les valeurs d'éclairement énergétique global horizontal pendant ces heures de la journée sont très basses.

Bogota												
4.63,-74.08,2560,-5												
dm	m	h	G_Dh	G_h	Ta	FF	DD	RH	RR	N		
1	1	1	1	0	0	5.6	0.5	83	94	0	4	
1	1	2	0	0	5.3	0.3	72	94	0	0	4	
1	1	3	0	0	5	0.3	114	93	0	0	4	
1	1	4	0	0	4.71	0.5	130	96	0	0	4	
1	1	5	0	0	4.41	0.3	128	96	0	0	4	
1	1	6	0	0	4.12	0.5	117	97	0	0	4	
1	1	7	32.67	38.79	5.3	0.3	96	94	0	0	4	
1	1	8	111.32	111.32	6.4	0.9	102	85	0	0	4	
1	1	9	256.13	334.03	8.99	0.7	79	76	0	0	0	
1	1	10	341.31	497.57	11.51	3.4	118	58	0	0	0	
1	1	11	304.33	316.94	11.96	2.7	95	54	0	1		
1	1	12	374.25	419.86	12.79	2.7	136	46	0	3		
1	1	13	380.3	770.51	14.86	3.4	100	44	0	2		
1	1	14	302.8	734.74	16.3	4.1	58	42	0	2		
1	1	15	344.04	534.2	16.76	3.1	100	42	0	2		
1	1	16	252.32	373.99	16.58	5.1	131	44	0	0		
1	1	17	127.13	145.73	15.38	3.1	81	50	0	4		
1	1	18	6.59	6.59	13.81	3.6	110	54	0	4		
1	1	19	0	0	12.87	1.9	97	67	0	4		
1	1	20	0	0	11.93	1.6	101	71	0	4		
1	1	21	0	0	10.98	1.3	114	77	0	4		
1	1	22	0	0	10.04	0.5	75	82	0	5		
1	1	23	0	0	9.09	0.2	85	86	0	5		
1	1	24	0	0	8.15	0.2	81	88	0	5		

Figure 19 Fichier Bogotá\_LESOSAI – Valeurs de G\_h

#Igh	49(1):50	49(1):51	49(1):52	49(1):53	49(1):54	
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	
111.323	74.3271	90.7044	56.8965	52.9455	111.323	
334.039	285.404	416.894	121.652	112.143	333.303	
497.582	377.699	474.68	156.599	149.318	496.177	
316.946	182.152	182.309	147.145	147.09	316.829	
419.867	286.38	233.001	145.985	161.846	419.431	
770.517	504.371	215.488	176.263	216.33	764.937	
734.747	493.065	168.277	156.861	342.707	730.662	
534.21	379.874	150.48	150.839	383.881	532.466	
373.999	294.617	116.135	121.514	372.741	372.899	
145.735	138.058	64.1509	70.1015	191.177	145.56	
6.59013	3.60821	3.59479	3.63163	3.5439	6.59013	
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	

Figure 20 Résultats des simulations d’Onde Courte - Igh

### 2.1.2. DONNEES GEOMETRIQUES ET PHYSIQUES DU BATIMENT

Pour la comparaison, un modèle cubique d'un immeuble typique d'un quartier de logement social a été simulé. Les caractéristiques générales du bâtiment, tels que les types de murs, les matériaux et la géométrie ont été fournies par les dessinateurs du projet [32].

#### Localisation

La localisation du bâtiment est définie par les données climatiques et son orientation. La Table 1 montre les informations basiques concernant la localisation du modèle cubique, lesquelles sont illustrées dans la Figure 21 et la Figure 22.

Table 1 Paramètres Localisation

<b>LOCALISATION</b>	Pays		Colombia
	Station Météo		Santa Fé de Bogota
	Fichier Climatique		Bogota_LESOSAI.cli
	Rotation	0° - 360°	0
	Altitude de l'ouvrage	m	2560

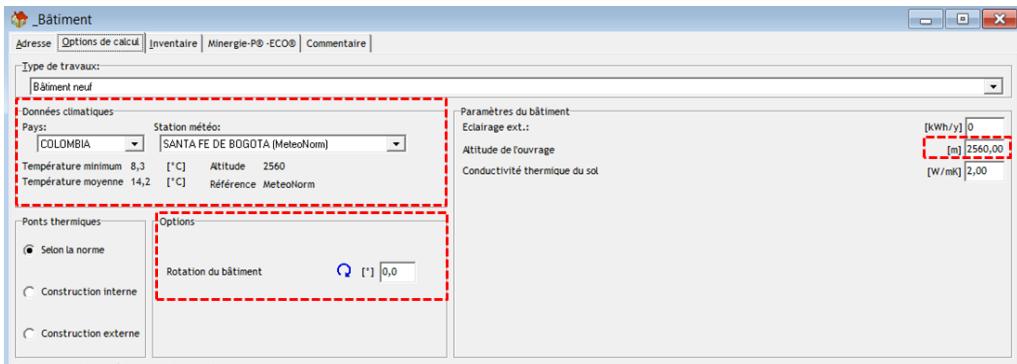


Figure 21 Localisation du bâtiment - LESOSAI

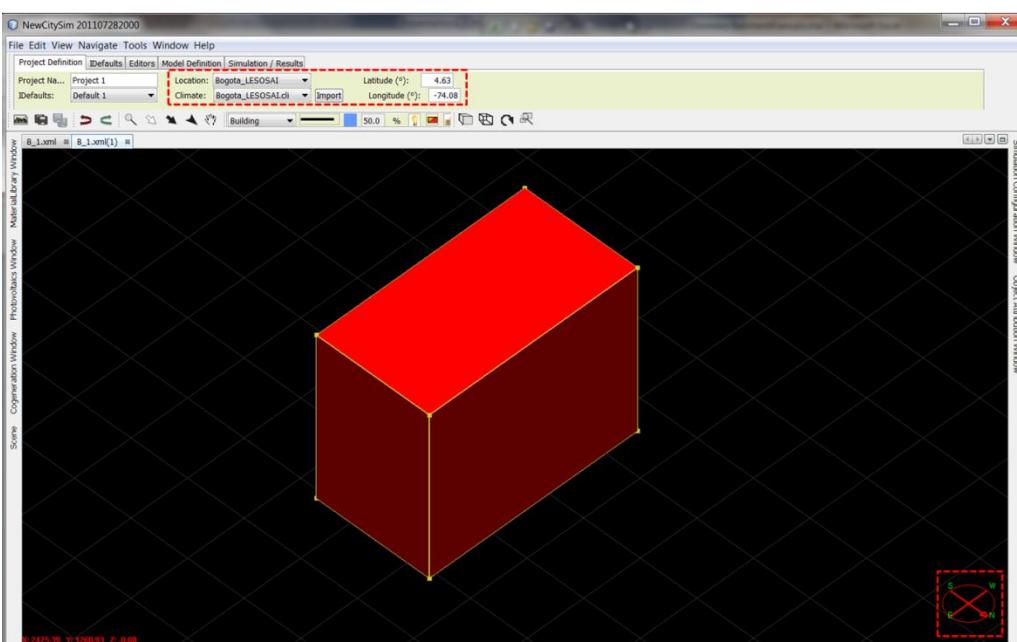


Figure 22 Localisation du bâtiment - CITYSIM

## Géométrie

La forme réelle du bâtiment a été simplifiée géométriquement, c'est-à-dire qu'on a pris un périmètre rectangulaire (sans reculs ou saillies dans la forme) avec la même surface et le même périmètre du plan original (Figure 23).

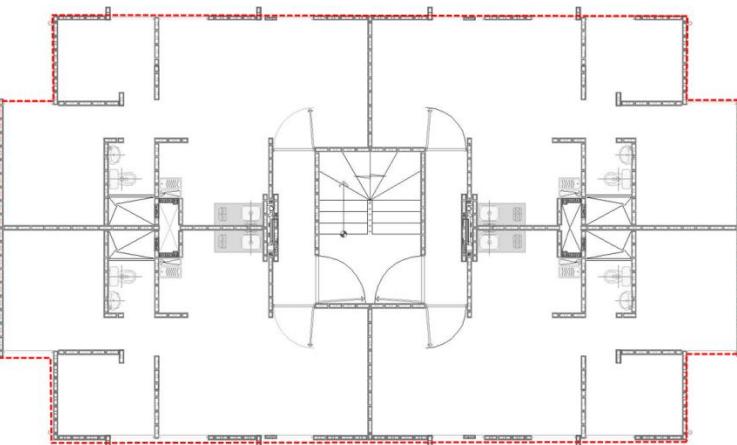


Figure 23 Plan original bâtiment type

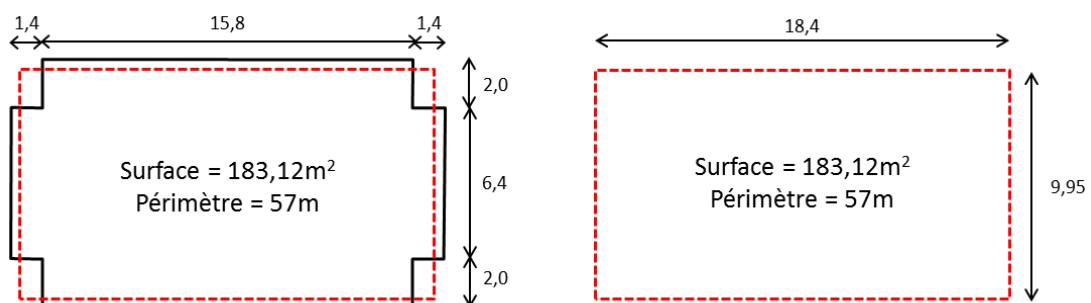


Figure 24 Forme original – Forme simplifié – PLAN

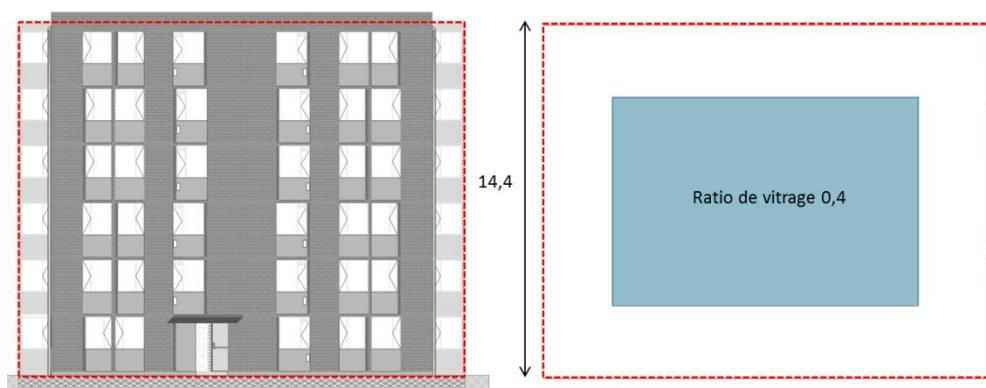


Figure 25 Forme original – Forme simplifié – COUPE

Le bâtiment est un grand prisme rectangulaire avec une hauteur de 14.4m et une surface de 183.12. Pour l'analyse on ne tient pas compte des différents étages du bâtiment, seulement du volume contenu parmi ses surfaces (façades, toiture et plancher) en obtenant un volume brut de 2636.93m<sup>3</sup>

Table 2 Paramètres géométrie bâtiment

<b>GEOMETRIE</b>	Volume brut	$\text{m}^3$	2636,93
	Volume net zone chauffée	$\text{m}^3$	2109,54
	Périmètre	$\text{m}$	57
	Grand largeur	$\text{m}$	18.39
	Petite largeur	$\text{m}$	9.96
	Hauteur	$\text{m}$	14.4
	Surface nette	$\text{m}^2$	183.12

Dans LESOSAI on introduit la surface brute de plancher (Agf) et le logiciel calcule la valeur nette (Ae) selon les normes choisies. Pour les calculs basés sur la norme CEN (EN 13790) Ae=Agf et le volume net est équivalent au 80% du volume brut du bâtiment.

Zone chauffée

Données Générales | Volume et Surfaces | Chauffage intermittent (EN ISO 13790) | Inventaire |

Hauteur et surface de chaque étage:

texte	Hauteur étage [m]	Agf [ $\text{m}^2$ ]	Ae, An [ $\text{m}^2$ ]	Ae calc [ $\text{m}^2$ ]
1	14,4	183,12	183,12	183,12

Volume net zone chauffée [ $\text{m}^3$ ]: 2109,54

Surface de référence énergétique Ae (SRE) [ $\text{m}^2$ ]: 183,12

Volume brut zone chauffée [ $\text{m}^3$ ]: 2636,93

Surface brute de plancher [ $\text{m}^2$ ]: 183,12

Figure 26 valeurs géométriques du bâtiment – LESOSAI

D'autre côté, CITYSIM calcule automatiquement les valeurs géométriques du bâtiment du modèle 3D importé en version .dxf

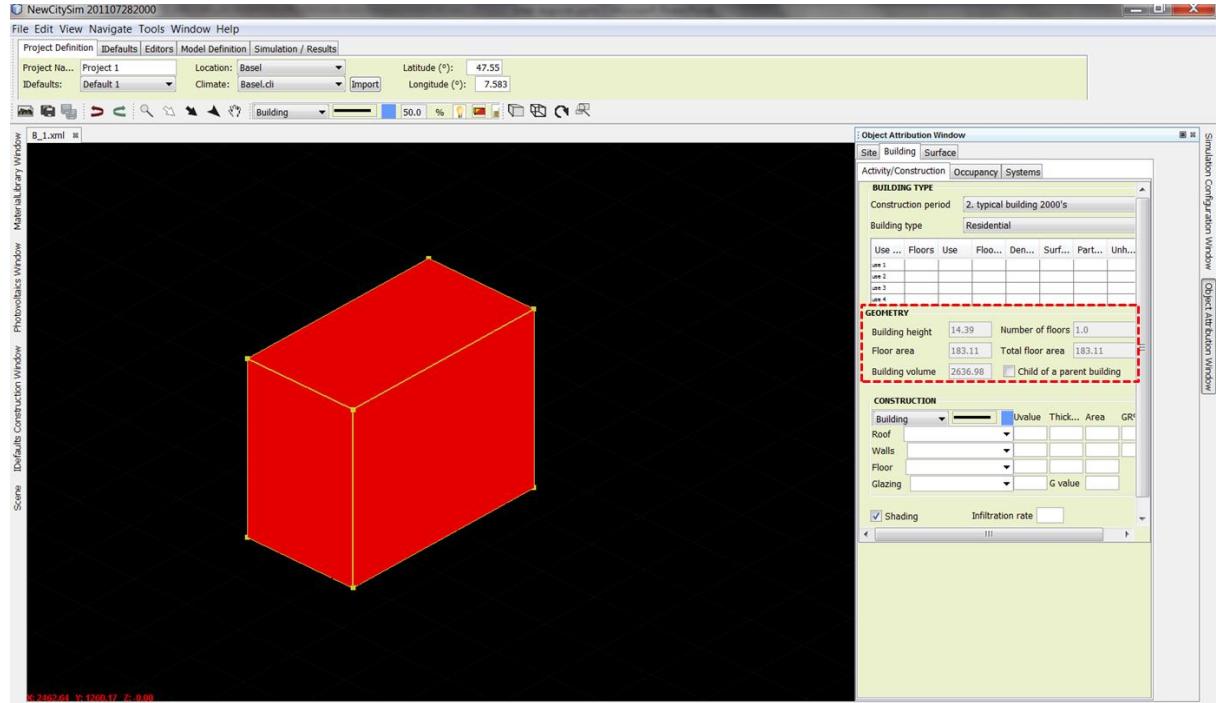


Figure 27 Valeurs géométriques du bâtiment – CITYSIM

## Surfaces – Propriétés

Le bâtiment est composé de 6 surfaces : 4 parois, le plancher et le plafond. Chaque surface a des caractéristiques générales et physiques différentes. La Table 3 montre les propriétés physiques de chaque surface issues de la base de données de LESOSAI.

Table 3 Paramètres physiques de surfaces

		PAROIS		PLANCHER	PLAFOND
		Brique	Crépi	Béton	Béton
Epaisseur (e)	m	0.3	0.02	0.15	0.1
Conductivité ( $\lambda$ )	W/m·K	0.44	1	1.8	1.8
Chaleur spécifique	J/kg·K	900	1000.8	1101.6	1101.6
Densité	kg/m <sup>3</sup>	1100	1800	2400	2400
Capacité Thermique massique (CT*3600=λ)	Wh/kg·K	0.25	0.278	0.306	
Valeur U	W/(m <sup>2</sup> ·K)	2.161		3.9474	5.114

A partir des 4 premiers paramètres LESOSAI et CITYSIM peuvent calculer la valeur U de la couche, à l'aide des formules suivantes :

Equation 1 Résistance Thermique

$$R_{tot} = \frac{1}{\alpha_{int}} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ext}}$$

Où :

$$\alpha_{int} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\alpha_{ext} = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

#### Equation 2 Coefficient de transmission thermique

$$U = \frac{1}{R_{tot}}$$

#### Réflectance d'ondes courtes

C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente. La valeur est calculée avec l'équation suivante :

#### Equation 3 Réflectance d'onde courtes murs

$$P_{sw} = P_{mur} * (1 - Gr) + P_{glass} * Gr$$

Où

$P_{mur}$  = Facteur de réflexion du matériel de surface

$Gr$  = Ratio de vitrage

$P_{glass}$  = Facteur de réflexion du vitrage

La valeur  $P_{mur}$  a été prise de la table suivante, où sont classifiés les différents matériaux de construction selon leur facteur de réflexion et d'absorption. En rouge se démarquent les rangs dans lesquels se trouvent les matériaux des surfaces étudiées.

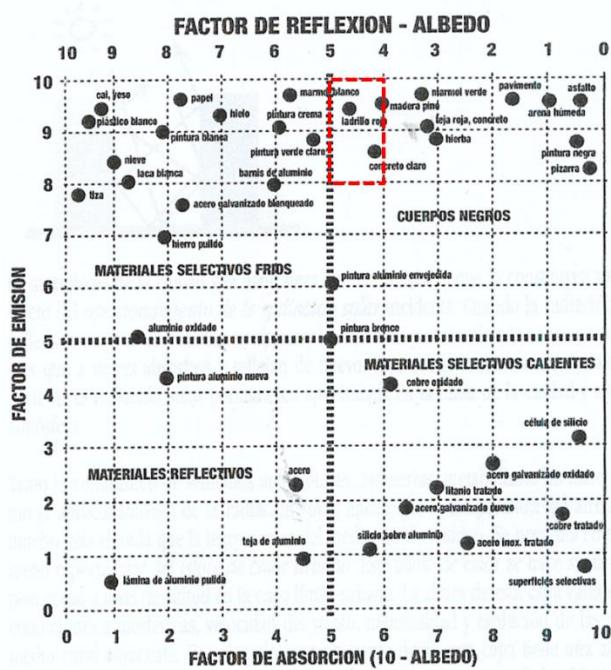


Figure 28 Facteur de réflexion et d'absorption des différents types de matériaux [33]

## Plafond

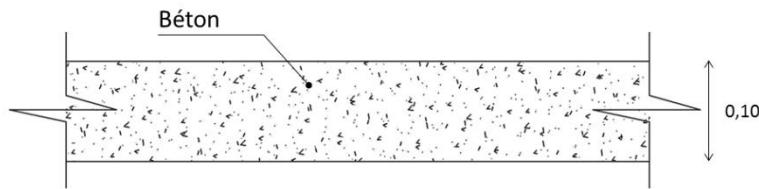


Figure 29 Détailé Plafond

Table 4 Paramètres Plafond

Plafond	Données Générales	Inclinaison	°	0
		Surface	$m^2$	183,12
		Situation		Contre extérieur
	Physique	U value	$W/(m^2K)$	5.1136
		Emissivité	%	90
		Coeff. absorption	%	90
		Réflectance d'ondes courtes	%	42
	Fenêtres	Ratio de vitrage	%	0

Réflectance d'ondes courtes pour plafond : **Psw=Pmur=0.42**

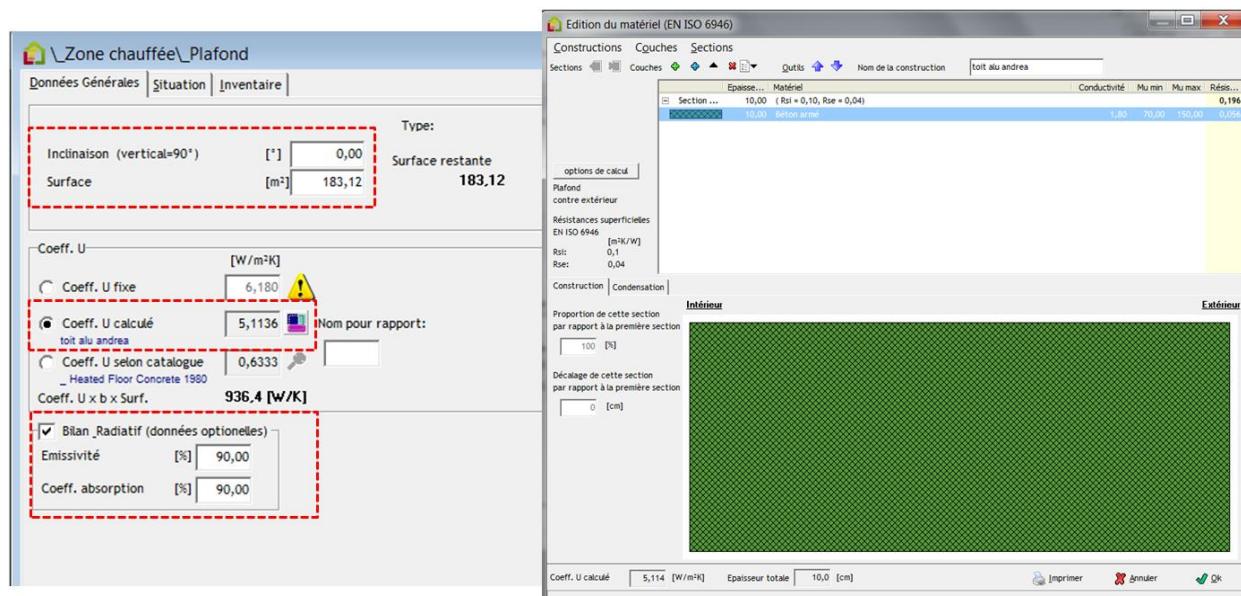


Figure 30 Paramètres Plafond – LESOSAI

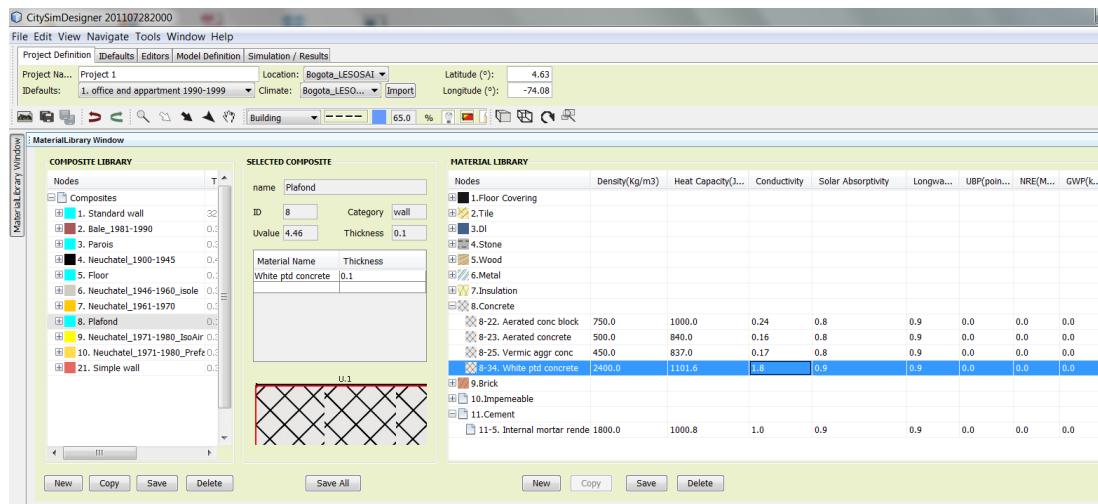


Figure 31 Paramètres Plafond – CITYSIM

### Plancher

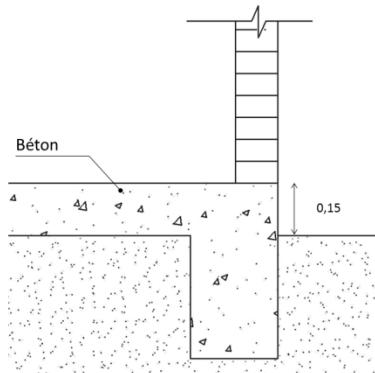


Figure 32 Détaille Plancher

Table 5Paramètres Plancher

<b>Plancher</b>	Données Générales	Inclinaison	°	0
		Surface	m <sup>2</sup>	183,12
		Situation		Contre terre
	Physique	U-value	W/(m <sup>2</sup> K)	3.9474
		K ground	W/(m <sup>2</sup> K)	4.8
		Emissivité	%	90
		Coeff. absorption	%	90
		Réflectance d'ondes courtes	%	42
		Fenêtres	Ratio de vitrage	0

Réflectance d'ondes courtes pour plancher : **Psw=Pmur=0.42**

Le coefficient de transmission thermique à travers le sol est calculé de la manière suivante :

#### Equation 4 Kground

$$K_{ground} = \frac{1}{R_{ground}}$$

$$R_{ground} = \frac{1}{\alpha_{int}} + \sum \frac{e}{\lambda}$$

Où :  $\alpha_{int} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

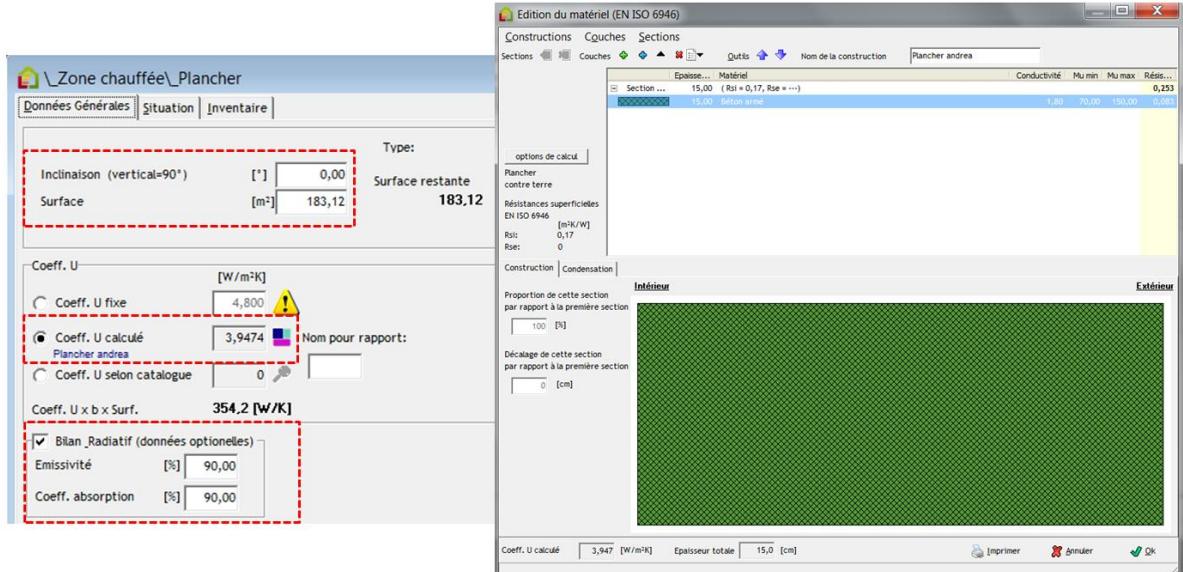


Figure 33 Paramètres Plancher - LESOSAI

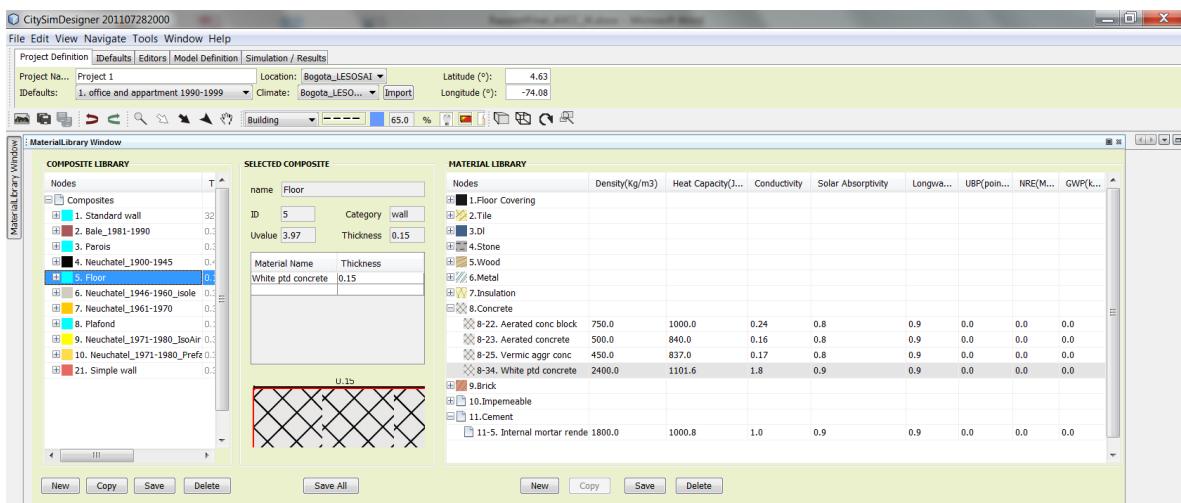


Figure 34 Paramètres Plancher - CITYSIM

## Façades Est et Ouest

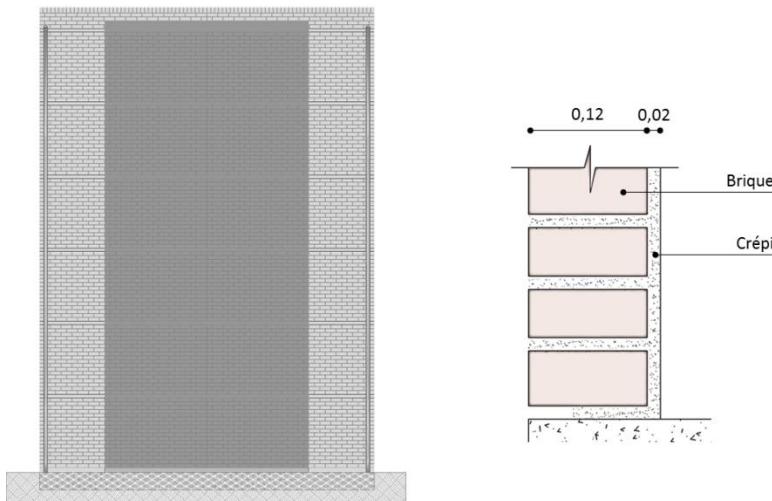


Figure 35 Façade Est et Ouest – Détail de la paroi

Table 6 Paramètres façades Est et Ouest

Façade Est et Ouest	Données Générales	Orientation	°	90 - 270
		Inclinaison	°	90
		Surface	m <sup>2</sup>	143.424
		Situation		Contre extérieur
	Physique	U-value	W/(m <sup>2</sup> K)	<b>2.161</b>
		Emissivité	%	<b>90</b>
		Coeff. absorption	%	<b>90</b>
		Réflectance d'ondes courtes	%	50
	Fenêtres	Ratio de vitrage	%	0

Les façades Est et Ouest sont composées uniquement par murs en brique de 30cm et une couche en crépi de 0.02cm, elles n'ont pas de vitrage. Selon l'équation suivante on obtient la valeur de réflectance d'ondes courtes :

Equation 3 Réflectance d'onde courtes murs

$$P_{SW} = P_{mur} * (1 - Gr) + P_{glass} * Gr$$

$$P_{SW} = 0.5 * (1-0) + 0$$

$$P_{SW} = 0.5$$

$$P_{SW} = P_{mur}$$

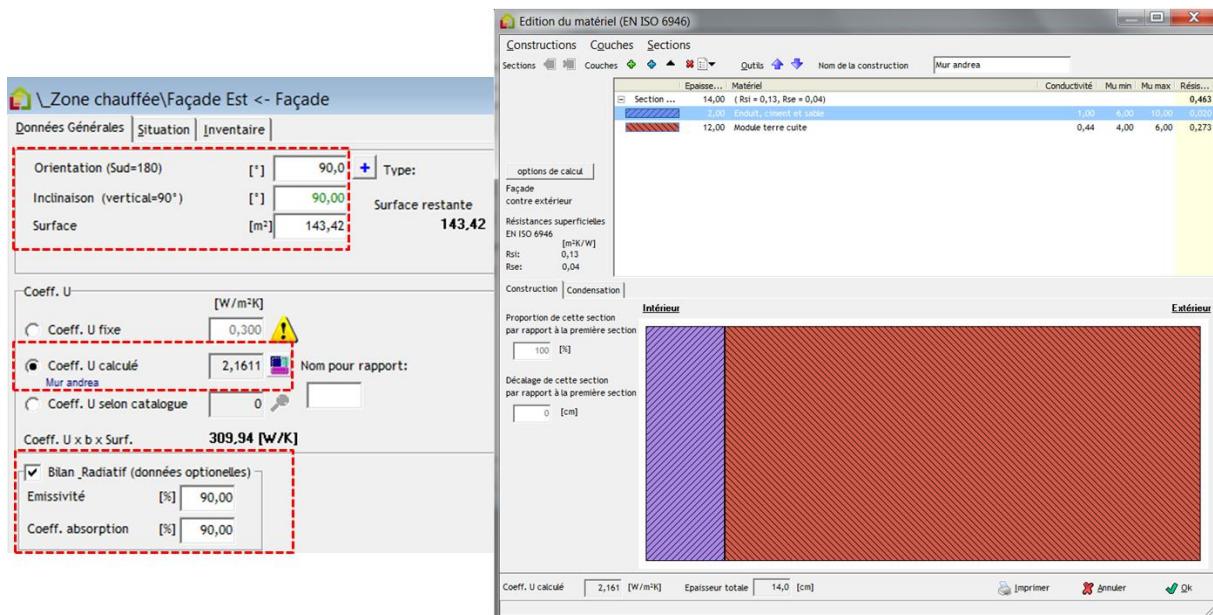


Figure 36 Paramètres Façades Est et Ouest - LESOSAI

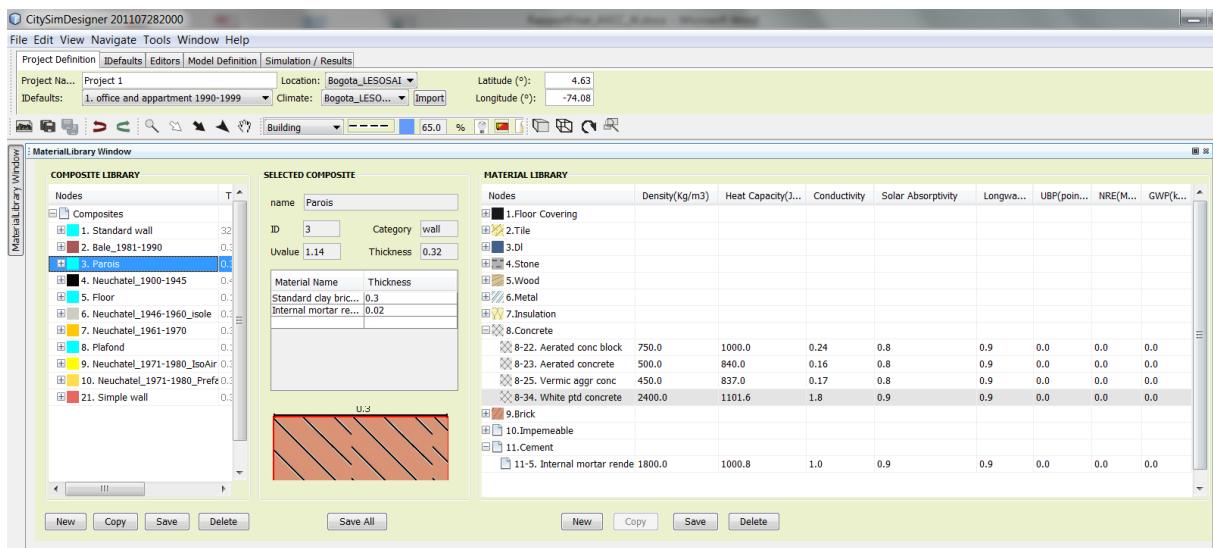


Figure 37 Paramètres façade Est et Ouest - CITYSIM

## Façades Nord et Sud



Figure 38 Façade Nord et Sud – Détail de la paroi

Table 7 Façades Nord et Sud

Façade Nord et Sud	Données Générales	Orientation	°	0 - 180
		Inclinaison	°	90
		Surface	m <sup>2</sup>	18.39*14.4
		Situation		Contre extérieur
	Physique	U-value	W/(m <sup>2</sup> K)	2.161
		Emissivité	%	90
		Coeff. absorption	%	90
		Réflectance d'ondes courtes	%	30
	Fenêtres	Ratio de vitrage	%	40
		Surface	m <sup>2</sup>	105.93
		Largeur	cm	1248
		Hauteur	cm	849
		Vitrage simple	mm	4
		Fraction du cadre	%	30
		G-value	%	92
		Uglobal	W/(m <sup>2</sup> K)	5.87
		Stores		pas
		BlindsIrradianceCutOff	W/(m <sup>2</sup> K)	1385
		Fraction Ombrée	%	0

## Réflectance d'ondes courtes pour façades Nord et Sud

Les façades Nord et Sud sont composées par de la brique et du verre principalement. Pour calculer la réflectance d'ondes courtes on a pris pour le verre une valeur équivalente à 0.00 en considérant que la lumière qui ressort des vitrages est négligeable. Le ratio de vitrage approximé de ces façades est de 0.4

Numériquement on obtient

Equation 3 Réflectance d'onde courtes murs

$$P_{SW} = P_{MUR} * (1-Gr) + P_{GLASS} * Gr$$

$$P_{SW} = 0.5 * (1-0.4) + 0 * 0.4$$

$$P_{SW} = 0.5 * 0.6 + 0$$

$$P_{SW} = 0.3$$

## Fenêtres - LESOSAI

En sachant que les façades Nord et Sud ont un ratio de vitrage équivalent au 40% du total de la façade, nous avons créé sur LESOSAI une grande surface vitrée sur les façades Nord et Sud avec les caractéristiques les plus proches des conditions réelles du bâtiment :

Paramètres du vitrage :

Valeur g ou Facteur Solaire : C'est le pourcentage de l'énergie solaire totale (directe et indirecte ou absorbée) transférée à l'intérieur à travers le verre. 3mm de verre clair est une valeur-g d'environ 86% et un coefficient d'ombrage de 100% [34]

Le vitrage utilisé dans le projet est un vitrage simple de 4mm, dont le fournisseur est GUARDIAN. Ci-dessous on montre les caractéristiques du verre prises du catalogue.

Coating	Substrate	Light Transmission [%]	Light Reflect. Outdoors [%]	Light Reflect. Indoors [%]	Colour Render. Index Ra(D65)	Solar Factor [%]	Shading Coefficient	Solar Energy			U-Value Air [W/m²K]	U-Value 90% Argon [W/m²K]
								Trans-mission [%]	Reflect. Outdoors [%]	Absorp-tion [%]		
none	2mm Clear	91	8	8	100	89	1.02	88	8	4	5.9	5.9
none	3mm Clear	90	8	8	99	87	1.00	86	8	6	5.8	5.8
none	4mm Clear	90	8	8	99	86	.99	84	8	8	5.8	5.8
none	5mm Clear	90	8	8	99	85	.97	82	8	10	5.8	5.8

Figure 39 Spécifications du verre - Catalogue GUARDIAN

Sur LESOSAI on a cherché le type de fenêtre avec la valeur U la plus proche de celle du vitrage réel. Le type de fenêtre choisi a une fraction de cadre du 30% et une valeur-g de 92%. Le coefficient U total est de 5.87W/(m²·K).

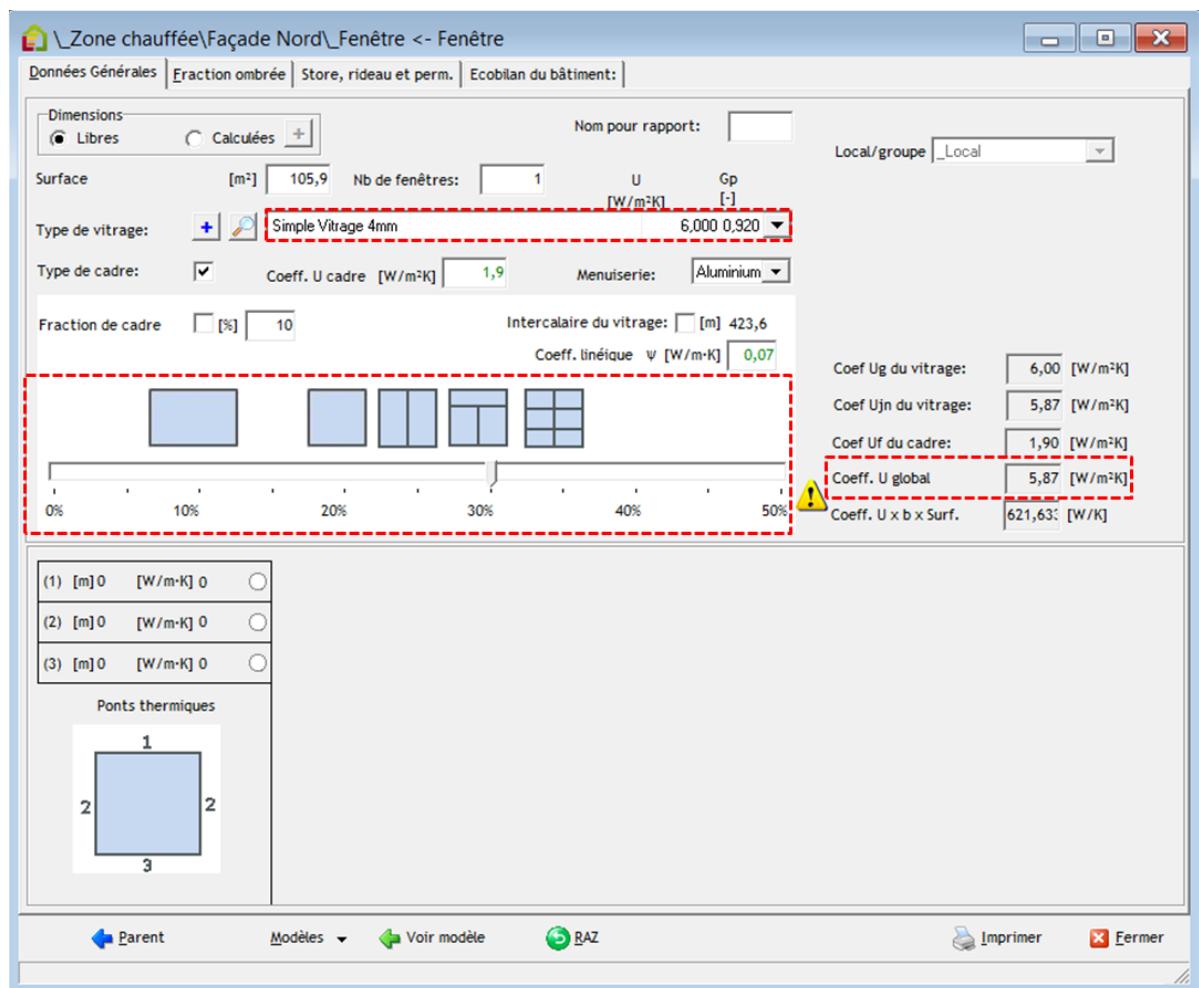


Figure 40 Données Générales Fenêtre Façade Nord et Sud - LESOSAI

Les dimensions de la surface vitrée correspondent au 40% de la surface totale des façades Nord et Sud (voir Figure 41)

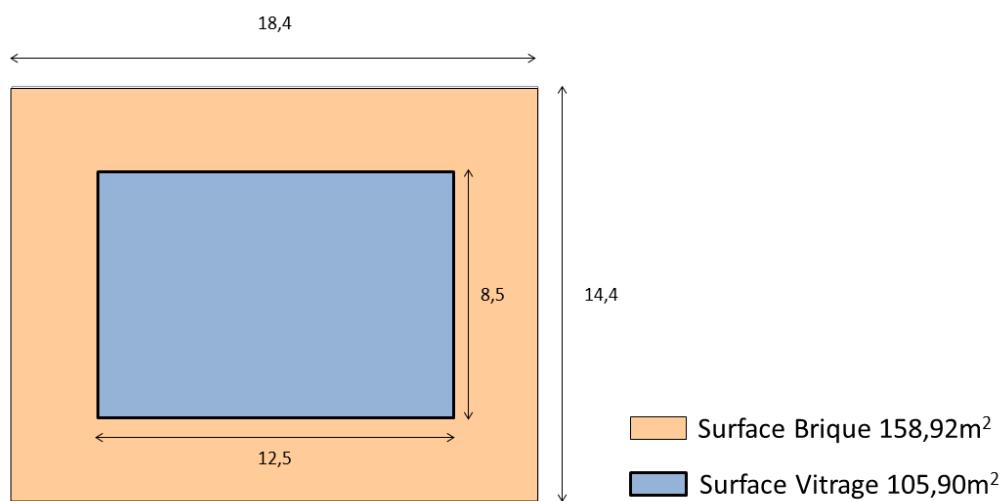


Figure 41 Dimensions surface vitrée façades Nord et Sud

Selon les caractéristiques morphologiques de murs qui encadrent la surface vitrée (voir Figure 42) la fraction ombrée de la fenêtre est négligeable.

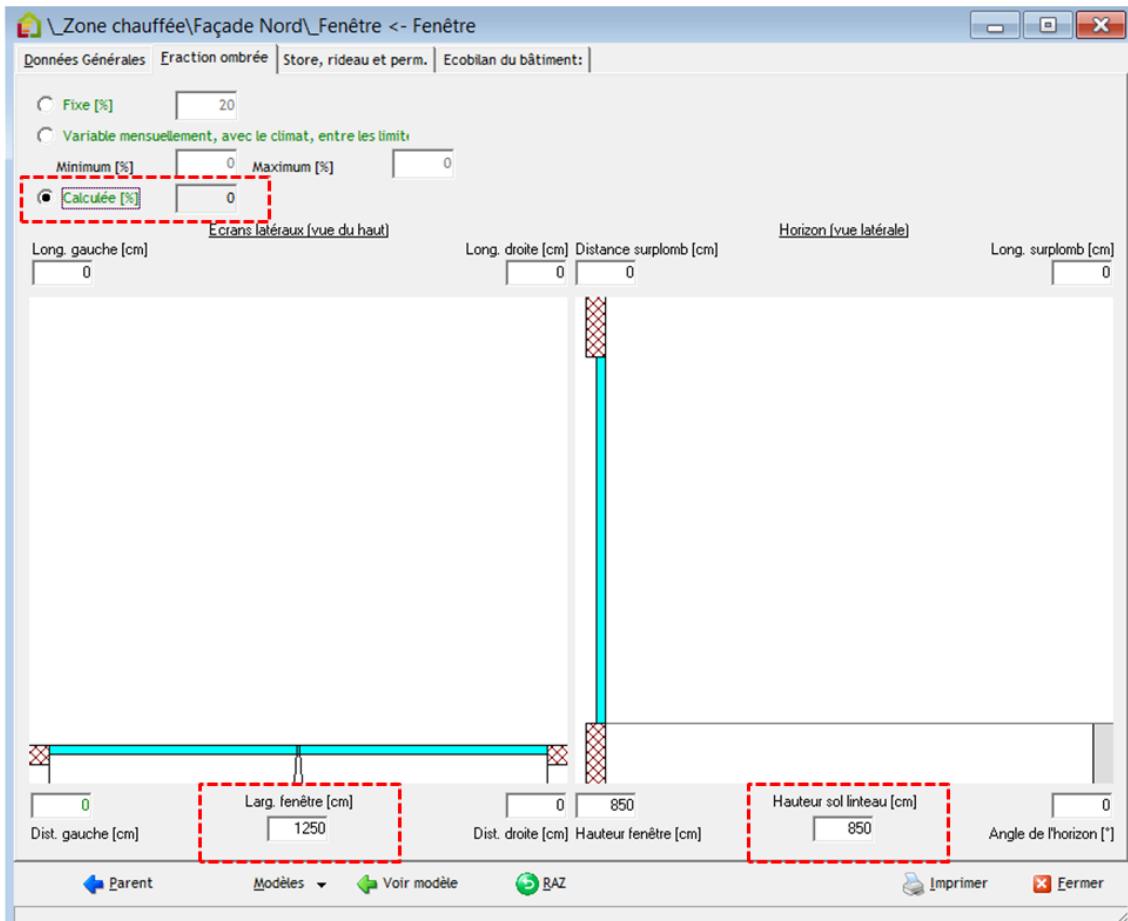


Figure 42 Fraction ombrée fenêtres Façades Nord et Sud - LESOSAI

### Fenêtres - CITYSIM

Pour définir les paramètres des fenêtres sur CitySim il faut entrer les valeurs de ratio de vitrage, fraction ombrée, g-value, et u-value.

Pour faire les simulations avec les données les plus proches à ceux de LESOSAI la fraction du cadre est tenue en compte dans le calcul de la valeur g de la manière suivante :

#### Equation 5 Valeur-G CitySim

$$\text{Valeur-G CitySim} = \text{Valeur-G LESOSAI} * (1 - \text{Fraction du cadre LESOSAI})$$

Où :

Valeur-G LESOSAI= 0.92

Fraction du cadre LESOSAI = 30%

$$\text{Valeur-G CitySim} = 0.92 * (1 - 0.3)$$

$$\text{Valeur-G CitySim} = 0.64$$

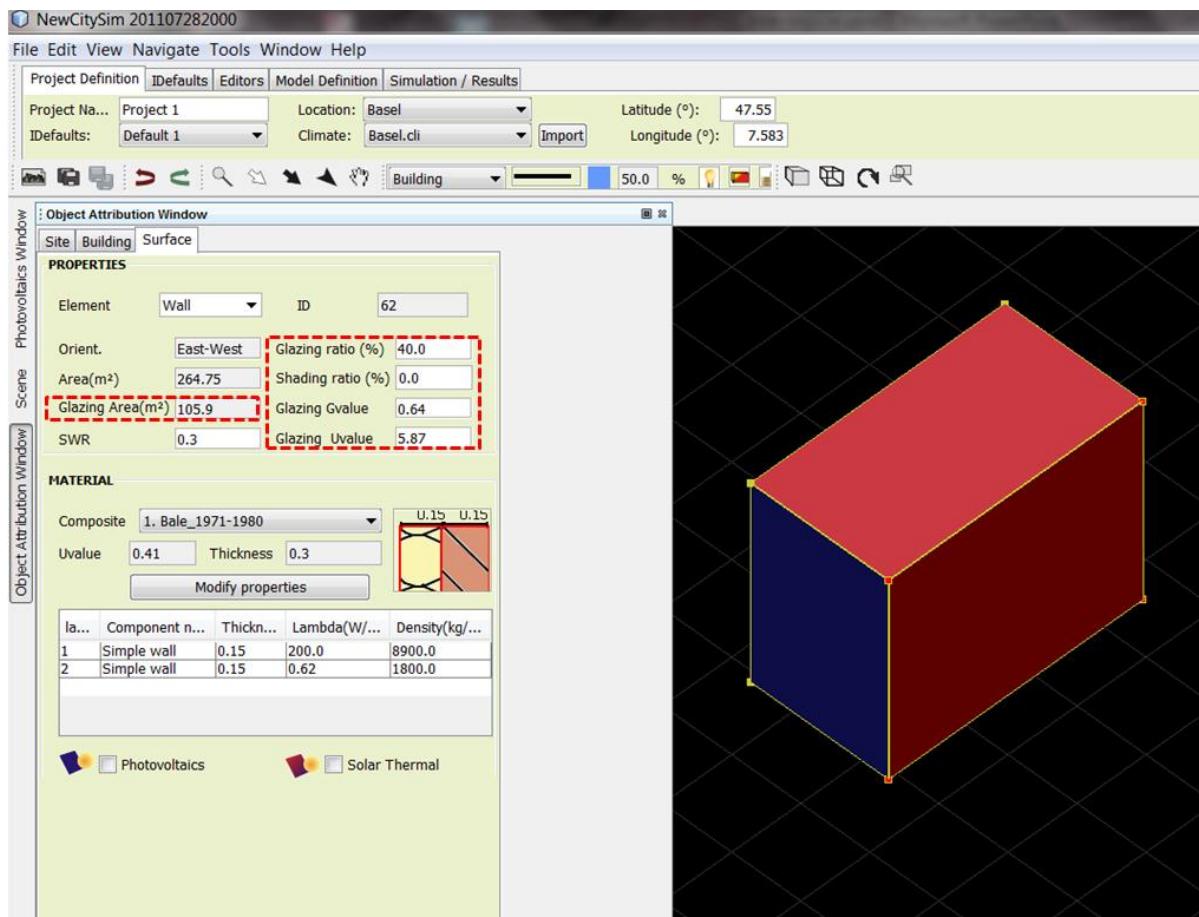


Figure 43 Paramètres fenêtres Façades Nord et Sud - CITYSIM

## Stores

Le modèle simulé dans ce cas n'a pas de stores. Pour désactiver les stores sur LESOSAI il suffit de sélectionner « Pas de stores » (voir Figure 44)

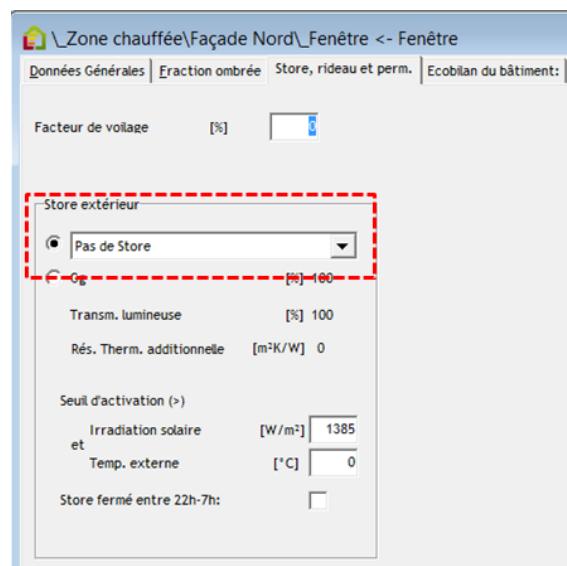
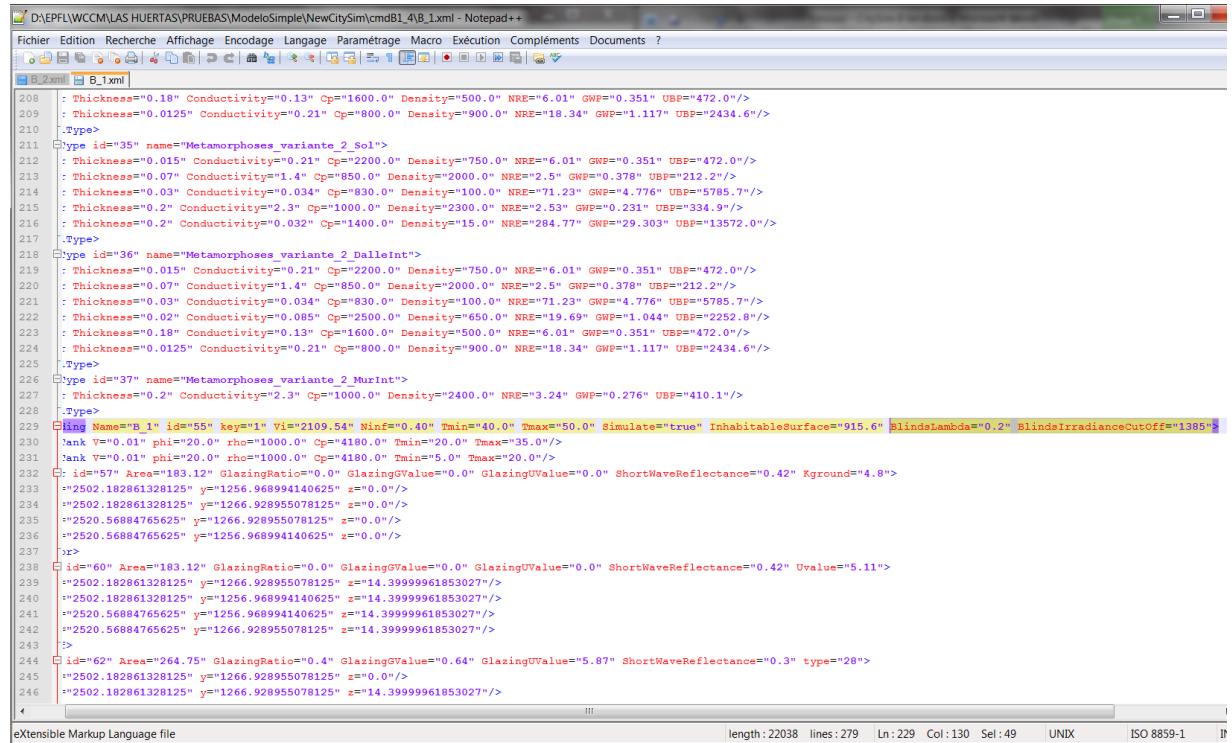


Figure 44 Désactivation de stores - LESOSAI

Sur CITYSIM un modèle de stores a été mis en œuvre, dans lequel la fraction non ombrée de store est une fraction de l'irradiation incidente sur la façade. Les stores sont abaissées complètement si l'éclairement énergétique direct normal sur la façade dépasse 150W/m<sup>2</sup>, et sont rentrés s'il tombe en dessous de 50 W/m<sup>2</sup> [29]. Pour désactiver le seuil d'activation nous avons ajouté dans le fichier .xml les données suivantes.

BlindsLambda="0.2" BlindsIrradianceCutOff="1385"



```

208 : Thickness="0.18" Conductivity="0.13" Cp="1600.0" Density="500.0" NRE="6.01" GWF="0.351" UBP="472.0" />
209 : Thickness="0.0125" Conductivity="0.21" Cp="800.0" Density="900.0" NRE="18.34" GWF="1.117" UBP="2434.6" />
210 .: Type>
211 <type id="35" name="Metamorphoses_variante_2_Sol">
212 : Thickness="0.015" Conductivity="0.21" Cp="2200.0" Density="750.0" NRE="6.01" GWF="0.351" UBP="472.0" />
213 : Thickness="0.07" Conductivity="1.4" Cp="850.0" Density="2000.0" NRE="2.5" GWF="0.378" UBP="212.2" />
214 : Thickness="0.03" Conductivity="0.034" Cp="830.0" Density="100.0" NRE="71.23" GWF="4.776" UBP="5785.7" />
215 : Thickness="0.2" Conductivity="2.3" Cp="1000.0" Density="2300.0" NRE="2.53" GWF="0.231" UBP="334.9" />
216 : Thickness="0.2" Conductivity="0.032" Cp="1400.0" Density="15.0" NRE="284.77" GWF="29.303" UBP="13572.0" />
217 .: Type>
218 <type id="36" name="Metamorphoses_variante_2_DalleInt">
219 : Thickness="0.015" Conductivity="0.21" Cp="2200.0" Density="750.0" NRE="6.01" GWF="0.351" UBP="472.0" />
220 : Thickness="0.07" Conductivity="1.4" Cp="850.0" Density="2000.0" NRE="2.5" GWF="0.378" UBP="212.2" />
221 : Thickness="0.03" Conductivity="0.034" Cp="830.0" Density="100.0" NRE="71.23" GWF="4.776" UBP="5785.7" />
222 : Thickness="0.02" Conductivity="0.085" Cp="2500.0" Density="650.0" NRE="19.69" GWF="1.044" UBP="2252.8" />
223 : Thickness="0.18" Conductivity="0.13" Cp="1600.0" Density="500.0" NRE="6.01" GWF="0.351" UBP="472.0" />
224 : Thickness="0.0125" Conductivity="0.21" Cp="800.0" Density="900.0" NRE="18.34" GWF="1.117" UBP="2434.6" />
225 .: Type>
226 <type id="37" name="Metamorphoses_variante_2_MurInt">
227 : Thickness="0.2" Conductivity="2.3" Cp="1000.0" Density="2400.0" NRE="3.24" GWF="0.276" UBP="410.1" />
228 .: Type>
229 <img Name="B_1" id="55" key="1" Vi="2109.54" Ninf="0.40" Tmin="40.0" Tmax="50.0" Simulate="true" InhabitableSurface="915.6" BlindsLambda="0.2" BlindsIrradianceCutOff="1385" />
230 <rank Vr="0.01" phi="20.0" rho="1000.0" Cp="4180.0" Tmin="20.0" Tmax="35.0" />
231 <rank Vr="0.01" phi="20.0" rho="1000.0" Cp="4180.0" Tmin="5.0" Tmax="20.0" />
232 <: id="57" Area="183.12" GlazingRatio="0.0" GlazingGValue="0.0" GlazingUVValue="0.0" ShortWaveReflectance="0.42" Kground="4.8" >
233 <=2502.182861328125 y="1256.968994140625" z="0.0" />
234 <=2502.182861328125 y="1266.928955078125" z="0.0" />
235 <=2520.56884765625 y="1266.928955078125" z="0.0" />
236 <=2520.56884765625 y="1256.968994140625" z="0.0" />
237 >>
238 <id="60" Area="183.12" GlazingRatio="0.0" GlazingGValue="0.0" GlazingUVValue="0.0" ShortWaveReflectance="0.42" Uvalue="5.11" >
239 <=2502.182861328125 y="1266.928955078125" z="14.39999961853027" />
240 <=2502.182861328125 y="1256.968994140625" z="14.39999961853027" />
241 <=2520.56884765625 y="1256.968994140625" z="14.39999961853027" />
242 <=2520.56884765625 y="1266.928955078125" z="14.39999961853027" />
243 >>
244 <id="62" Area="264.75" GlazingRatio="0.4" GlazingGValue="0.64" GlazingUVValue="5.87" ShortWaveReflectance="0.3" type="28" >
245 <=2502.182861328125 y="1266.928955078125" z="0.0" />
246 <=2502.182861328125 y="1266.928955078125" z="14.39999961853027" />

```

Figure 45 Désactivation de stores dans le fichier .xml - CITYSIM

La valeur de 1385 W/m<sup>2</sup> est ce qu'on appelle la **constante solaire**, qui est le rayonnement (éclairement énergétique) solaire atteint aux confins de l'atmosphère. Cette valeur ne sera jamais atteinte dans le modèle de rayonnement de CitySim et par conséquence les stores ne seront jamais activés.

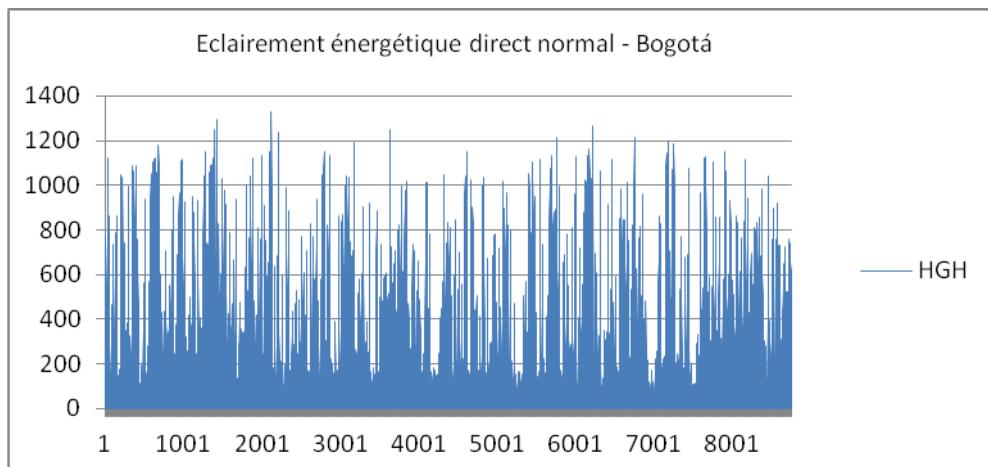


Figure 46 Eclairement énergétique direct normal, Bogotá – Source données MeteoNorm

### 2.1.3. CAPACITE THERMIQUE DU BATIMENT

LESOISAI [30] aide: le calcul de la capacité thermique est décrit dans la norme internationale EN ISO 13 786 :2007 « Performance thermique des composants de bâtiment – Caractéristiques thermiques dynamiques – Méthodes de calcul ».

La capacité thermique d'un élément de construction décrit sa capacité d'accumuler la chaleur (ou le froid). Elle s'exprime en  $J/(m^2 \cdot K)$  ou en  $kJ/(m^2 \cdot K)$  et est symbolisée par  $k$  ou éventuellement par  $k$ . La chaleur est emmagasinée dans des éléments massifs. Il est donc important que ceux-ci se trouvent à l'intérieur de l'enveloppe thermique et en contact avec l'air intérieur. En fait chaque élément de construction a deux capacités thermiques : la première pour la face intérieure et la seconde pour la face extérieure. C'est évidemment la première qui est importante puisqu'elle influence le climat intérieur du bâtiment.

La capacité thermique d'un local ou d'un bâtiment se calcule ensuite en fonction des capacités thermiques de tous les éléments de construction. La capacité thermique dépend de la fréquence de variation des influences thermiques. La période utilisée dans LESOSAI est la journée (86'400 s = 24 heures).

Le calcul de la capacité thermique nécessite les propriétés suivantes pour toutes les couches de l'élément :

Table 8 Propriétés pour calculer  $k$

e	m	épaisseur de la couche
A	$m^2$	Surface nette
P	$kg/m^3$	masse volumique - densité
v	$m^3$	volume
Cp	$J/(kg \cdot K)$	capacité thermique massique (=chaleur spécifique)

La capacité thermique calculée pour une couche est :

Equation 6 Capacité Thermique pour une Couche

$$k_i = p * v * Cp$$

**La capacité thermique** du bâtiment indique la capacité à amortir les fluctuations de température intérieure dues aux variations périodiques (24 h) des sources de chaleur externes ou internes.

La norme SIA 381/2 (§2.1.4) exige une valeur minimale de  $30 \text{ Wh}/(m^2 \cdot K)$  ou  $108 \text{ kJ}/(m^2 \cdot K)$ .

Dans un bilan thermique, elle est utilisée pour le calcul du facteur d'utilisation des gains solaires et internes. Pour ce calcul une détermination précise de la capacité thermique du bâtiment n'est pas nécessaire, une estimation selon la Table 9 est en général suffisante. La capacité thermique du bâtiment simulé doit être approximée à  $500 \text{ kJ}/(m^2 \cdot K)$  en tenant compte du type de construction.

Table 9 Capacité Thermique estimée selon différentes types de constructions

TYPE DE CONSTRUCTION	Capacité Thermique
Bâtiment très massif, tout bétonné, petites pièces (par ex. abris PC)	1000 kJ/(m <sup>2</sup> ·K)
Bâtiment très massif, grandes pièces (halle avec dalles en béton)	500 kJ/(m <sup>2</sup> ·K)
Villa parois brique, dalles en béton avec moquettes	500 kJ/(m <sup>2</sup> ·K)
Chalet en bois massif	300 kJ/(m <sup>2</sup> ·K)
Construction légère (cadre bois par ex)	100 kJ/(m <sup>2</sup> ·K)
Construction très légère	50 kJ/(m <sup>2</sup> ·K)

La capacité thermique du bâtiment (kJ/m<sup>2</sup>K) se calcule à partir de la capacité thermique des différents éléments de construction et est rapportée à la surface nette:

Equation 7 Capacité Thermique Bâtiment

$$k_{\text{tot}} = \frac{C_r}{A_{\text{sn}}} = \frac{\sum_i C_i}{A_{\text{sn}}}$$

Où:

$C_r$  = capacité thermique [kJ/K]

$C_i$  = capacité thermique de l'élément de construction n° i en kJ/K

$A_{\text{sn}}$  = surface nette du bâtiment en m<sup>2</sup>

La capacité thermique des éléments de construction est calculée selon la norme EN 13786:2005. Tous les murs du bâtiment doivent évidemment être définis avec la composition complète afin que le calcul puisse se faire

Table 10 Paramètres éléments de construction - calcul de la capacité thermique

	MURS	
	Brique	Crépi
Epaisseur (e)	m	0.3
Surface nette	m <sup>2</sup>	158.92
Densité	kg/m <sup>3</sup>	1100
Chaleur spécifique	J/(kg·K)	900
		1000.8

Table 11 Calcul Capacité Thermique des Murs

		p	v	Cp	Capacité Thermique du Couche (K <sub>i</sub> )		Capacité Thermique du Mur (k <sub>tot</sub> )
					p*c*Cp	kJ/K	
					J/K	X/1000	
FAÇADE NORD ET SUD	Couche en brique	1100	19.07	900	18879300	18879.3	24607.8792
	Couche en crépi	1800	3.18	1000.8	5728579.2	5728.5792	
FAÇADE EST ET OUEST	Couche en brique	1100	17.21	900	17037900	17037.9	22208.0328
	Couche en crépi	1800	2.87	1000.8	5170132.8	5170.1328	

Table 12 Calcul Capacité Thermique Bâtiment

CAPACITÉ THERMIQUE MUR				CAPACITÉ THERMIQUE TOTAL (k <sub>tot</sub> )	SURFACE NETTE (A <sub>sn</sub> )	CAPACITÉ THERMIQUE PAR m <sup>2</sup>
NORD	SUD	EST	OUEST			
kJ/K	kJ/K	kJ/K	kJ/K			
24607.88	24607.88	22208.03	22208.03	93631.82	183.12	<b>511.3</b>

Avec le calcul on constate que la capacité thermique du bâtiment est effectivement approximée à 500kJ/m<sup>2</sup>K.

Pour les simulations CitySim calcule automatiquement la capacité thermique du bâtiment. Par contre dans LESOSAI il faut mettre la valeur exacte (voir Figure 47)



Figure 47 Données Générales, Capacité Thermique LESOSAI

#### 2.1.4. PROFIL D'OCCUPATION HORAIRE

LESOSAI [30] aide : Les calculs selon la CEN (EN 13790 : Horaire) nécessitent de connaître les heures de présence des personnes et les heures de fonctionnement des appareils électriques. L'éclairage artificiel ne sera enclenché que durant les heures d'occupation des locaux. Pour les calculs horaires, les apports thermiques internes dus aux personnes, à l'éclairage et aux appareils électriques varieront en fonction de l'heure de la journée, du jour de la semaine et du mois.

Le cahier technique SIA 2024 « Conditions d'utilisation standard pour l'énergie et les installations du bâtiment » fournit ces horaires pour 44 types de locaux. L'année prise en compte pour les calculs comprend 365 jours dont 52 samedis, 52 dimanches et aucun jour férié. Il n'y a aucune période de vacances sauf pour les écoles (le mois de juillet). Lesosai suppose que l'année commence un lundi.

## Présence des personnes (taux d'occupation)

Le dégagement de chaleur et d'humidité d'une personne dépend de son activité métabolique. En fonction de l'affectation des locaux, le cahier SIA 2024 en fixe l'activité d'où découle le dégagement de chaleur des personnes. **1 met** correspond à 58 W par  $m^2$  de surface du corps. Une personne "standard" a une surface de  $1.8 m^2$ . La chaleur produite par le corps humain se répartit en chaleur sensible (chaleur qui augmentera la température ambiante) et chaleur latente (chaleur qui évaporera l'humidité à la surface de la peau).

Table 13 Activité des personnes (P : personne)

Activité	Activité métabolique [met]	Dégagement de chaleur (total) [W/P]	Chaleur sensible [W/P]	Chaleur latente [W/P]	Production d'humidité [(g/h)/P]
repos	0.8	83.52	57.1	26.4	37.7
assis tranquille	1.0	104.40	62.7	41.7	59.6
debout inactif	1.2	125.28	68.2	57.1	81.5
activité sédentaire	1.2	125.28	68.2	57.1	81.5
activité moyenne debout (cuisine, industrie)	2.0	208.80	90.3	118.5	169.2
gymnastique	2.8	292.32	112.5	179.9	256.9

Pour un bâtiment résidentiel (séjour chambre à coucher) LESOSAI assume une activité « debout inactif » dont la chaleur sensible dégagée est équivalent à 68.2 W/P.

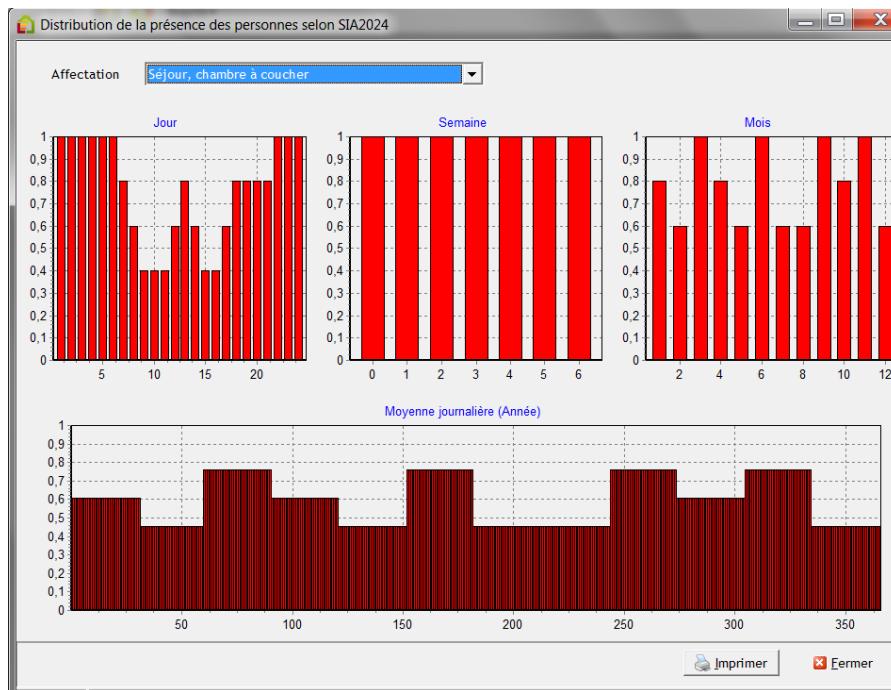


Figure 48 Taux d'occupation par les personnes d'un séjour chambre à coucher

## Éclairage (taux d'utilisation)

Les horaires de présence des personnes sont fixés par le cahier technique SIA 2024. Il n'est pas possible de modifier ces horaires sauf pour le calcul de l'éclairage. Dans ce cas, la journée est simplement divisée en 2 parties :

- Le jour : de 7h à 18h : pendant cette période l'éclairage naturel contribue à l'éclairage des locaux.
- La nuit : de 18h à 7h

Dans un bâtiment résidentiel LESOSAI assume un horaire d'utilisation d'éclairage de 18h à 22h.

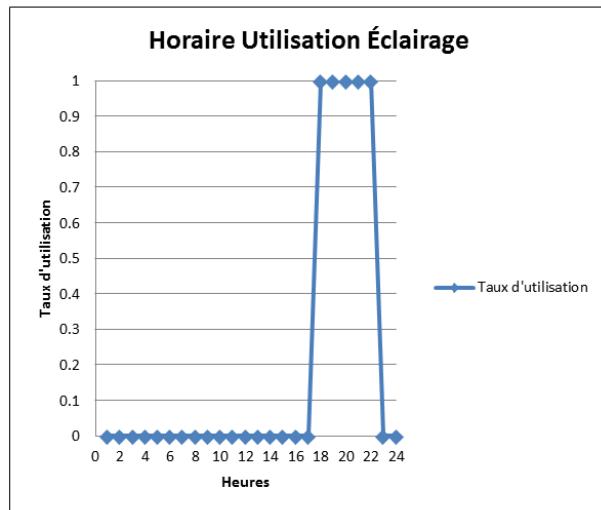


Figure 49 Taux d'utilisation d'éclairage

## Présence des appareils (taux d'utilisation)

Les horaires de fonctionnement des appareils sont fixés par le cahier technique SIA 2024 et ne peuvent pas être modifiés par l'utilisateur.



Figure 50 Taux d'utilisation des appareils

## Comparaison Profiles d'Occupation CITYSIM - LESOSAI

CitySim tient en compte seulement la présence des personnes, tandis que LESOSAI calcule le bilan thermique du bâtiment en connaissant les taux de présences des personnes, et celles d'utilisation d'éclairage et des appareils.

Afin de calculer également sur CitySim un profil d'occupation complet, c'est-à-dire considérant les apports énergétiques des personnes, appareils et lumières, et de travailler avec les mêmes valeurs d'occupation nous avons fait les calculs suivants :

*Nombre maximum d'occupants :*

**108** personnes par bâtiment (on estime une moyenne de 4.5 personnes par famille (4 adultes et 1 enfant) [15], 1 famille dans chaque appartement, 4 appartements par étage, et 6 étages par bâtiment).

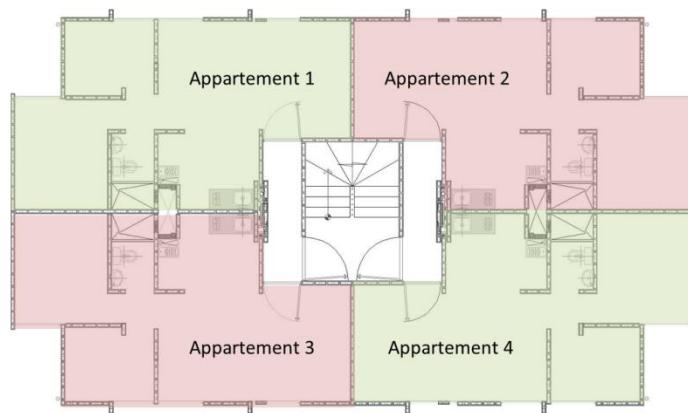


Figure 51 Vue en plan - Étage type bâtiment

Pour un bâtiment résidentiel LESOSAI assume un dégagement de chaleur de 68.2 W/P, tandis que CitySim assume une émission par défaut de 90 W/P de chaleur sensible par occupant. Pour travailler avec des valeurs similaires nous avons calculé le dégagement de chaleur de 108 occupants avec 90 W/P :

Equation 8 Dégagement total de chaleur - CitySim

$$\text{Occ} * \text{Qs}$$

$$108P * 90 \text{ W/P}$$

$$9720 \text{ W}$$

Où

Occ= Occupants Bâtiment (personnes)

Qs= Chaleur sensible par occupant assumé par CitySim (W)

Cette valeur est divisée par la valeur de chaleur sensible assumée par LESOSAI afin de savoir le nombre de personnes à tenir en compte dans LESOSAI.

**Equation 9 Quantité d'occupants pour LESOSAI**

$$\frac{Qs_1}{Qs_2}$$

$$\frac{9720 \text{ W}}{68.2 \text{ W/P}}$$

$$142,5 \text{ P}$$

Où

$Qs_1$  = Chaleur sensible par occupant assumé par CitySim (W)

$Qs_2$  = Chaleur sensible par occupant assumé par Lesosai (W/P)

Si on assume une occupation de 142,5 P sur LESOSAI, on obtient un dégagement de chaleur équivalent à 9718,4 W, une valeur très approximée à celle de CitySim.

Figure 52 Données Générales Local – Personnes - LESOSAI

Pour définir l'énergie dégagée par les personnes selon la distribution de leur présence :

**Equation 10 Énergie Occupants selon distribution de présence**

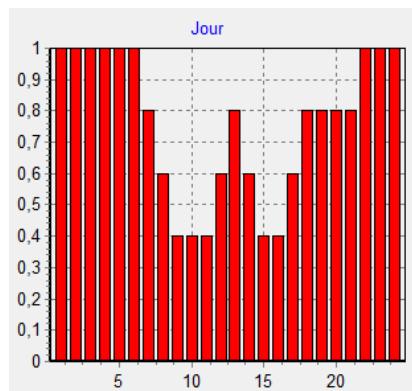
$$T_{occ} * Occ * Qs$$

Où

$T_{occ}$ = Taux d'occupation horaire

$Occ$ = Occupants (personnes)

$Qs$ = Chaleur sensible CitySim (W)



**Figure 53 Taux d'occupation horaire - LESOSAI**

**Table 14 Calcul énergie d'occupants selon distribution de présence**

Heures	Taux d'occupation	PERSONNES		Personnes selon taux d'occupation	Puissance par personne	Puissance selon taux
		Personnes	P			
1	1	108	P	108.00	90.00	9720
2	1					9720
3	1					9720
4	1					9720
5	1					9720
6	1					9720
7	0.8					7776
8	0.6					5832
9	0.4					3888
10	0.4					3888
11	0.4					3888
12	0.6					5832
13	0.8					7776
14	0.6					5832
15	0.4					3888
16	0.4					3888
17	0.6					5832
18	0.8					7776
19	0.8					7776
20	0.8					7776
21	0.8					7776
22	1					9720
23	1					9720
24	1					9720

Pour définir l'énergie dégagée par les appareils selon son taux d'utilisation :

**Equation 11 Énergie appareils selon taux d'utilisation**

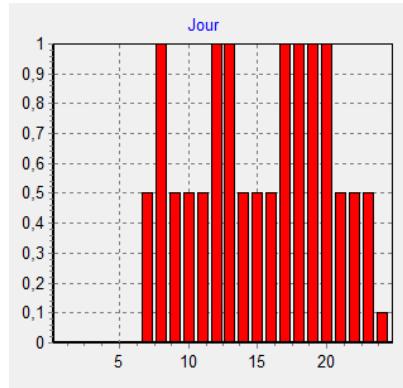
$$T_{ut} * P_{app} * A_{net}$$

Où

$T_{ut}$ = Taux d'utilisation horaire des appareils

$P_{app}$ = Puissance spécifique d'appareils (W)

$A_{net}$ =Surface Nette (m<sup>2</sup>)



**Figure 54 Taux d'utilisation des appareils**

La valeur de puissance spécifique assumée par LESOSAI est équivalente à 2 W/m<sup>2</sup>. Cette valeur est pour chaque étage du bâtiment. Pour un bâtiment à 6 étages, la puissance est de 12 W/m<sup>2</sup>.

**Table 15 Calcul énergie des appareils selon taux d'utilisation**

Heures	Taux d'utilisation	APPAREILS		Surface Nette	Puissance selon taux	Occupants pour CitySim
		Puissance Spécifique	Puissance taux d'occupation			
		W/m <sup>2</sup>		m2	W	W/90WP
1	0	12.00	0	183.12	0.00	0.00
2	0		0		0.00	0.00
3	0		0		0.00	0.00
4	0		0		0.00	0.00
5	0		0		0.00	0.00
6	0		0		0.00	0.00
7	0.5		6		1098.72	12.21
8	1		12		2197.44	<b>24.42</b>
9	0.5		6		1098.72	12.21
10	0.5		6		1098.72	12.21
11	0.5		6		1098.72	12.21
12	1		12		2197.44	<b>24.42</b>
13	1		12		2197.44	<b>24.42</b>
14	0.5		6		1098.72	12.21
15	0.5		6		1098.72	12.21
16	0.5		6		1098.72	12.21
17	1		12		2197.44	<b>24.42</b>
18	1		12		2197.44	<b>24.42</b>
19	1		12		2197.44	<b>24.42</b>
20	1		12		2197.44	<b>24.42</b>
21	0.5		6		1098.72	12.21
22	0.5		6		1098.72	12.21
23	0.5		6		1098.72	12.21
24	0.1		1.2		219.74	2.44

Pour définir l'énergie dégagée par l'éclairage selon son taux d'utilisation :

**Equation 12 Énergie éclairage selon taux d'utilisation**

$$Tut * Pecl * Anet$$

Où

Tut= Taux d'utilisation horaire d'éclairage

Papp= Puissance spécifique d'appareils (W)

Anet=Surface Nette (m<sup>2</sup>)

La valeur de puissance spécifique choisie pour l'éclairage est équivalente à 8.91 W/m<sup>2</sup>. Cette valeur est pour chaque étage du bâtiment. Pour un bâtiment à 6 étages, la puissance totale est de 53.47 W/m<sup>2</sup>.

**Table 16 Calcul énergie d'éclairage selon taux d'utilisation**

Heures	Taux d'utilisation	Puissance Spécifique	ÉCLAIRAGE		Surface Nette	Puissance selon taux	Occupants pour CitySim
			W/m <sup>2</sup>	Puissance taux d'occupation			
1	0			0		0.00	0.00
2	0			0		0.00	0.00
3	0			0		0.00	0.00
4	0			0		0.00	0.00
5	0			0		0.00	0.00
6	0			0		0.00	0.00
7	0			0		0.00	0.00
8	0			0		0.00	0.00
9	0			0		0.00	0.00
10	0			0		0.00	0.00
11	0			0		0.00	0.00
12	0	53,47W/m <sup>2</sup>		0	183.12m <sup>2</sup>	0.00	0.00
13	0			0		0.00	0.00
14	0			0		0.00	0.00
15	0			0		0.00	0.00
16	0			0		0.00	0.00
17	0			0		0.00	0.00
18	1			53.47		9791.43	108.79
19	1			53.47		9791.43	108.79
20	1			53.47		9791.43	108.79
21	1			53.47		9791.43	108.79
22	1			53.47		9791.43	108.79
23	0			0		0.00	0.00
24	0			0		0.00	0.00

Pour obtenir le profil d'occupation total on calcule la somme des énergies obtenues et le résultat est divisé par le dégagement de chaleur par personne sur CitySim. Finalement on divise tout par la valeur maximale obtenue.

**Equation 13 Calcul pour profile d'occupation total**

$$T_{tot} = \frac{\frac{Qs + Papp + Pecl}{90W/P}}{N_{max}}$$

Où

Ttot= Taux total ou Profil de distribution final

Qs= Chaleur sensible occupants

Papp= Puissance spécifique d'appareils (W)

Pecl= Puissance spécifique d'éclairage (W)

Nmax= Valeur maximal d'occupants

Table 17 Calcul Profil d'Occupation total

Heures	Personnes +Appareils +Éclairage	SOMME			Distribution Final
		Puissance par personne	Personnes	Valeur maximale	
			W/P	P	
1	9720.00		108.00		0.47
2	9720.00		108.00		0.47
3	9720.00		108.00		0.47
4	9720.00		108.00		0.47
5	9720.00		108.00		0.47
6	9720.00		108.00		0.47
7	8874.72		98.61		0.43
8	8029.44		89.22		0.39
9	4986.72		55.41		0.24
10	4986.72		55.41		0.24
11	4986.72		55.41		0.24
12	8029.44	90W/P	89.22	/229	0.39
13	9973.44		110.82		0.48
14	6930.72		77.01		0.34
15	4986.72		55.41		0.24
16	4986.72		55.41		0.24
17	8029.44		89.22		0.39
18	19764.87		219.61		0.96
19	19764.87		219.61		0.96
20	19764.87		219.61		0.96
21	18666.15		207.40		0.91
22	20610.15		229.00		1.00
23	10818.72		120.21		0.52
24	9939.74		110.44		0.48

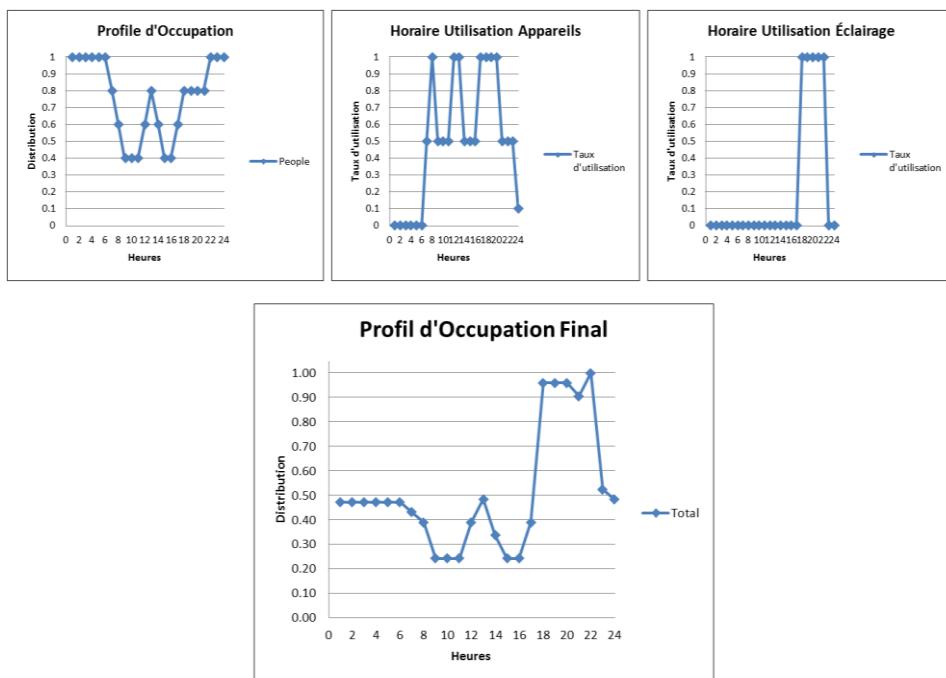
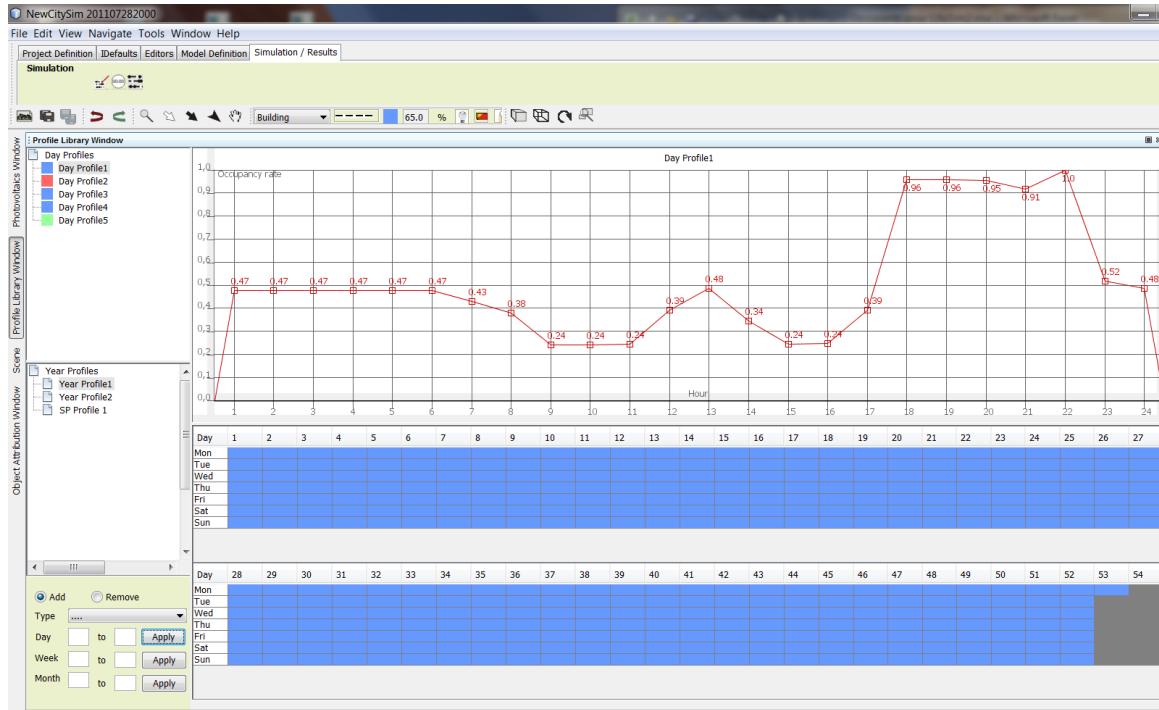


Figure 55 Profiles d'occupation Personnes + Appareils + Éclairage / Profil d'occupation Total

Finalement sur CitySim on introduit le profil d'occupation final. Ce profil est utilisé pour tous les jours de l'année (Figure 56)



**Figure 56 Profil Library Window - CITYSIM**

Dans le fichier .xml il est possible aussi de changer le profil d'occupation. Pour le nombre de personnes on a mis 241.19 afin que CitySim tienne en compte la chaleur dégagée par les appareils et l'éclairage.

## Figure 57 Fichier .xml Occupants - CitySim

### 2.1.5. BESOINS DE REFROIDISSEMENT ET DE CHAUFFAGE

Le but des simulations est d'obtenir le comportement thermique dynamique à l'intérieur du bâtiment, c'est-à-dire qu'on n'a pas besoin des données pour le refroidissement ni de chauffage.

Pour désactiver dans LESOSAI le calcul des besoins de climatisation nous avons mis un seuil de température pour l'été de 60°C, et de -30°C pour l'hiver, en sachant que ces températures ne seront jamais atteintes, et par conséquent que ni le refroidissement ni le chauffage seraient jamais enclenchés.

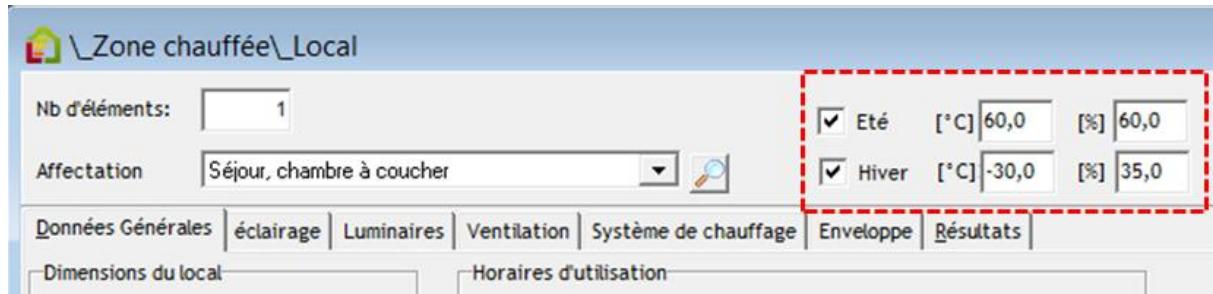


Figure 58 Donnée générales pour le local

La graphique suivante constate la désactivation du chauffage et du refroidissement, par conséquent les températures résultantes de simulations seront celles obtenues que par l'effet de l'inertie de l'enveloppe du bâtiment.

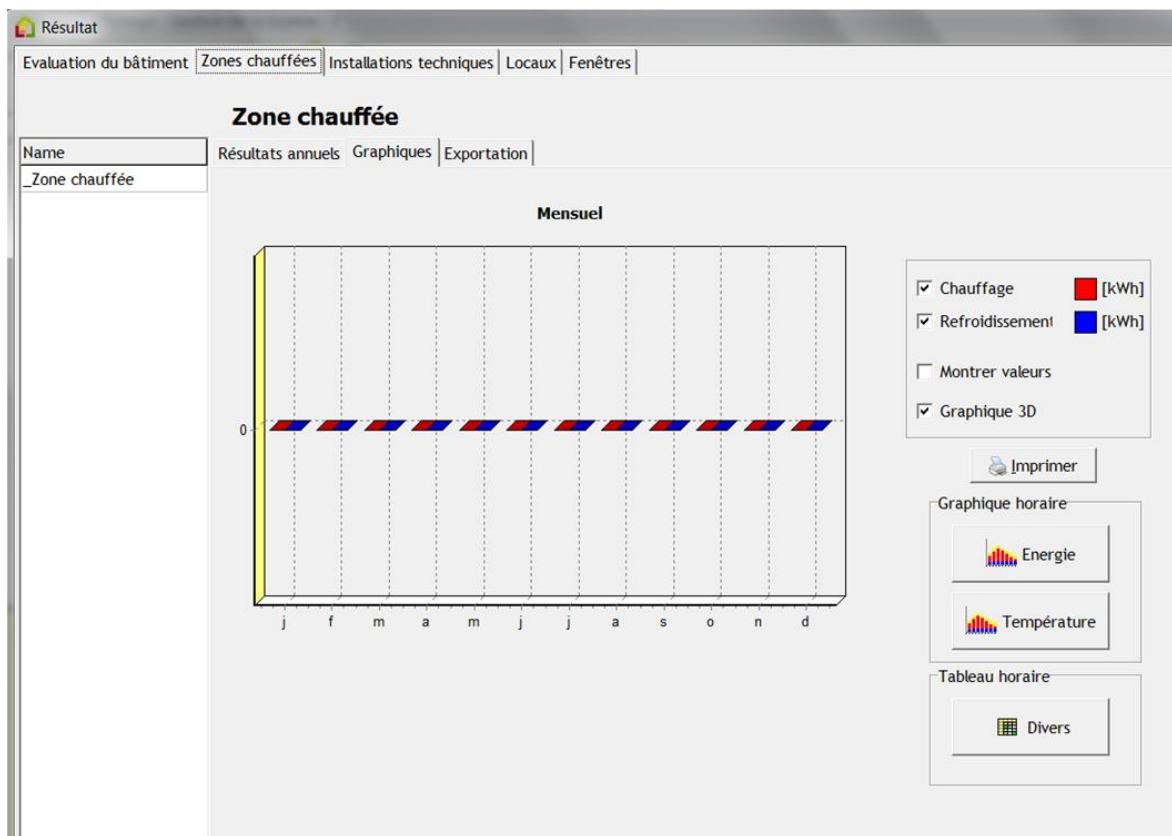


Figure 59 Résultats Chauffage et Refroidissement - LESOSAI

Pour désactiver le chauffage et le refroidissement dans CitySim nous avons fait quelques modifications sur le fichier .xml. D'abord nous avons enlevé la **source de chaleur** et après pour les besoins de température nous avons déterminé une valeur de  $T_{min}=40$  et de  $T_{max}=50$

```

220 <Layer Thickness="0.18" Conductivity="0.13" Cp="1600.0" Density="500.0" NRE="6.01" GWP="0.351" />
221 <Layer Thickness="0.0125" Conductivity="0.21" Cp="800.0" Density="900.0" NRE="18.34" GWP="1.1" />
222 </WallType>
223 <WallType id="37" name="Metamorphoses_variante_2_MurInt">
224 <Layer Thickness="0.2" Conductivity="2.3" Cp="1000.0" Density="2400.0" NRE="3.24" GWP="0.276" />
225 </WallType>
226 <Building Name="B_1" id="55" key="1" Vi="2109.54" Ninf="0.40" Tmin="40.0" Tmax="50.0" Simulat>
227 <heatTank V="0.01" phi="20.0" rho="1000.0" Cp="4180.0" Tmin="20.0" Tmax="35.0" />
228 <coolTank V="0.01" phi="20.0" rho="1000.0" Cp="4180.0" Tmin="5.0" Tmax="20.0" />
229 <heatSource beginDay="258" endDay="151">
230 <boiler id="1" name="PARKER T300L" fuelID="1" eta_th="0.8" Pmax="70344.0" />
231 </heatSource>
232 <Floor id="57" Area="183.12" GlazingRatio="0.0" GlazingGValue="0.0" GlazingUValue="0.0" ShortW>
233 <V0 x="2502.182861328125" y="1256.968994140625" z="0.0" />
234 <V1 x="2502.182861328125" y="1266.928955078125" z="0.0" />
235 <V2 x="2520.56884765625" y="1266.928955078125" z="0.0" />
236 <V3 x="2520.56884765625" y="1256.968994140625" z="0.0" />
237 </Floor>
238 <Roof id="60" Area="183.12" GlazingRatio="0.0" GlazingGValue="0.0" GlazingUValue="0.0" ShortW>
239 <V0 x="2502.182861328125" y="1266.928955078125" z="14.39999961853027" />
240 <V1 x="2502.182861328125" y="1256.968994140625" z="14.39999961853027" />

```

Figure 60 Fichier .xml – Heat Source - CITYSIM

Si nous mettions une  $T_{min}=-30$ , comme dans LESOSAI, CitySim augmentait le niveau d'infiltration d'air par les fenêtres «  $V_{dotVent}(m^3/s)$  » afin d'atteindre les températures minimales requises (Figure 61), et de cette façon les températures d'air intérieur résultantes étaient très basses.

#timeStep	49(1):49:T	49(1):49:I	49(1):49:C	49(1):49:VdotVent	49(1):Hea	49(1):Colc	49(1):Mac	49(1):Fuel	49(1):ElectricConsumption(J)	
1	11	0	0	0	6	18	18	0	0	0
2	9.9	0	0	0	5.8	18	18	0	0	0
3	9.5	0	0	0	5.8	18	18	0	0	0
4	9.3	0	0	0	5.8	18	18	0	0	0
5	9	0	0	0	5.8	18	18	0	0	0
6	8.7	0	0	0	5.8	18	18	0	0	0
7	9.5	0	0	0	5.7	18	18	0	0	0
8	11.1	0	0	0	5.8	18	18	0	0	0
9	12.4	0	0	0	5.4	18	18	0	0	0
10	14.3	0	0	0	5.1	18	18	0	0	0
11	14.8	0	0	0	5.1	18	18	0	0	0
12	15.5	0	0	0	5	18	18	0	0	0
13	17	0	0	0	4.7	18	18	0	0	0
14	18.2	0	0	0	4.5	18	18	0	0	0
15	18.7	0	0	0	4.5	18	18	0	0	0
16	18.6	0	0	0	4.6	18	18	0	0	0
17	18.1	0	0	0	5	18	18	0	0	0
18	16.6	0	0	0	5.1	18	18	0	0	0
19	15.7	0	0	0	5.1	18	18	0	0	0
20	15	0	0	0	5.2	18	18	0	0	0
21	14.2	0	0	0	5.3	18	18	0	0	0
22	13.4	0	0	0	5.3	18	18	0	0	0
23	12.7	0	0	0	5.4	18	18	0	0	0
24	11.9	0	0	0	5.5	18	18	0	0	0

Figure 61 Fichier TH.out - Résultats de VdotVent –  $T_{min}=-30$

Avec une  $T_{min}=40$ , le ratio d'infiltration par les fenêtres n'augmente pas, et on obtient des températures intérieures plus raisonnables (Figure 62)

#timeStep	49(1):49:T	49(1):49:H	49(1):49:C	49(1):49:C	49(1):49:VdotVent(m^3/s)	49(1):Hea	49(1):Colc	49(1):Mac	49(1):Fuel	49(1):ElectricConsumption(J)
1	18.2	919461	0	0	0	18	18	0	0	0
2	16	1010953	0	0	0	18	18	0	0	0
3	14.2	1088030	0	0	0	18	18	0	0	0
4	12.7	1152710	0	0	0	18	18	0	0	0
5	11.4	1208188	0	0	0	18	18	0	0	0
6	10.3	1255246	0	0	0	18	18	0	0	0
7	9.7	1280051	0	0	0	18	18	0	0	0
8	10	1266202	0	0	0	18	18	0	0	0
9	11.6	1197512	0	0	0	18	18	0	0	0
10	13.8	1107354	0	0	0	18	18	0	0	0
11	15.2	1046718	0	0	0	18	18	0	0	0
12	16.9	975855	0	0	0	18	18	0	0	0
13	19.2	876863	0	0	0	18	18	0	0	0
14	21.2	792656	0	0	0	18	18	0	0	0
15	22.6	736078	0	0	0	18	18	0	0	0
16	23.2	710231	0	0	0	18	18	0	0	0
17	22.8	724968	0	0	0	18	18	0	0	0
18	21.6	777747	0	0	0	18	18	0	0	0
19	20.3	832964	0	0	0	18	18	0	0	0
20	19	885388	0	0	0	18	18	0	0	0
21	17.8	935355	0	0	0	18	18	0	0	0
22	16.7	984155	0	0	0	18	18	0	0	0
23	15.6	1031458	0	0	0	18	18	0	0	0
24	14.5	1077130	0	0	0	18	18	0	0	0

Figure 62 Fichier TH.out – Résultats VdotVent – Tmin=40

Avec une Tmin=40 et Tmax=50 CitySim ne calcule pas les besoins de refroidissement, cependant il calcule les besoins de chauffage nécessaire pour arriver à 40°C. Comme nous avons enlevé la source de chaleur du fichier .xml, le calcul des besoins de chauffage n'affecte pas les températures intérieures, lesquelles montrent un comportement dynamique.

Dans le fichier des résultats des besoins énergétiques on constate que le refroidissement a été désactivé, et que le chauffage est calculé encore mais ce dernier n'est pas tenu en compte dans les températures résultantes.

#Total yearly energy demand & supply	
Heating (Wh):	1.12E+09
Cooling (Wh):	0
DHW (J):	0
Fuel (J):	0
Electric (J):	0
NRE (MJ):	0
GWP (kgCO2):	0
UBP (pts):	0

Figure 63 Fichier YearlyResults.out - Résultats Chauffage et Refroidissement - CITYSIM

### 2.1.6. RATIO D'INFILTRATION

C'est l'introduction involontaire d'air extérieur dans un bâtiment, généralement par des fissures dans l'enveloppe et par l'utilisation de portes pour le pas.

Sur LESOSAI on assume une exposition au vent faible, ce qui correspond à un rapport d'infiltration approximé à  $5,62 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . Une ventilation naturelle par les fenêtres n'est pas prévue.

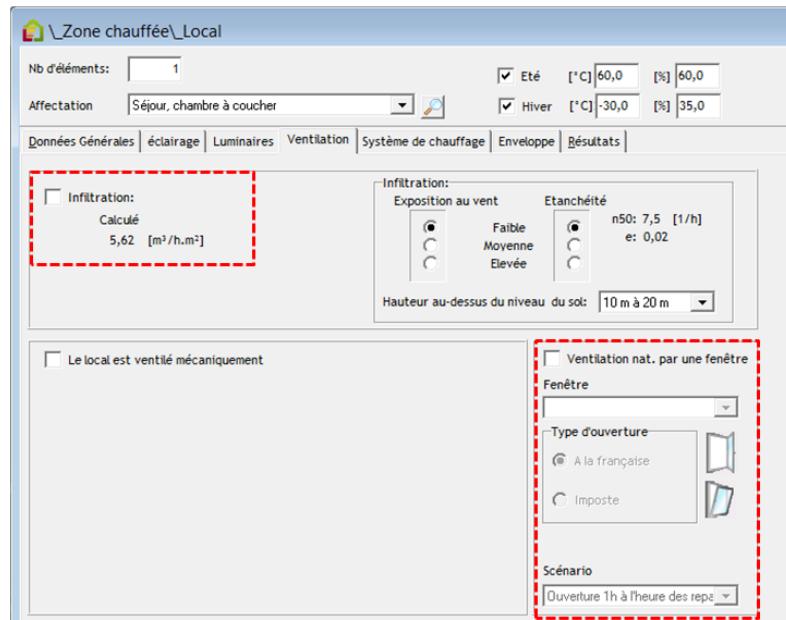


Figure 64 Ventilation Zone Chauffée – LESOSAI

La valeur de rapport d'infiltration sur CitySim est donnée en V/h. À l'aide de la formule suivante nous avons calculé le rapport d'infiltration équivalent à celui calculé par LESOSAI.

**Equation 14 Rapport d'infiltration de (m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>) à (V/h)**

$$\frac{\text{Ratio d'infiltration (m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)) * \text{Surface (m}^2\text{)}}{\text{Volume m}^3}$$

$$\frac{5,62 * 183,12}{2636,93}$$

Rapport d'infiltration= 0,4 V/h

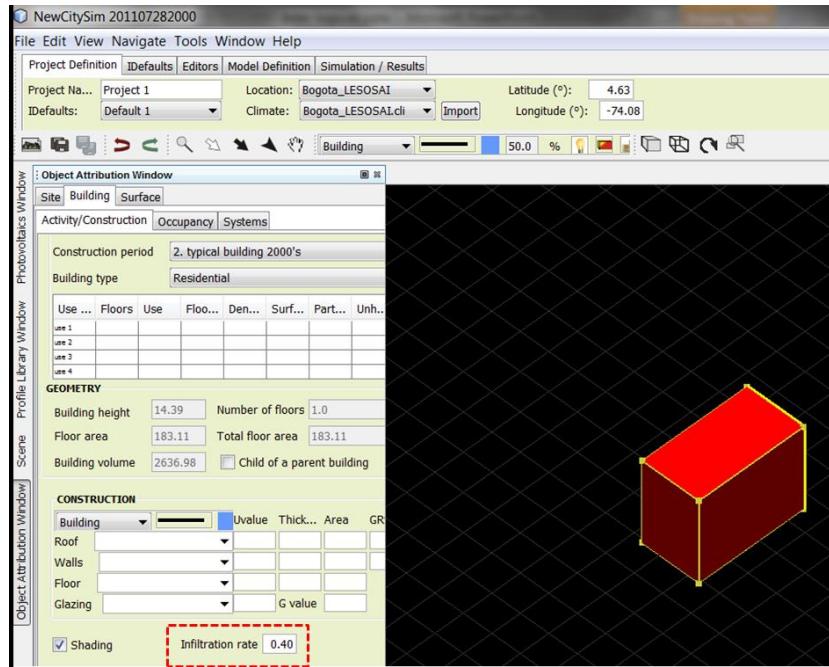


Figure 65 Ratio d'infiltration – CITYSIM

Finalement une quantité approximée de 60 paramètres a été évaluée, et plus de 200 simulations ont été faites pour assurer la simulation des modèles les plus similaires possibles dans les deux logiciels. La table ci-dessous montre le résumé des valeurs d'entrée par rapport à chaque paramètre du bâtiment et de ses surfaces. Les valeurs en orange sont les valeurs qui changent sur CitySim, mais qui sont équivalents à ceux de LESOSAI.

Table 18 Résumé des paramètres bâtiment

BATIMENT				
LOCALISATION	Pays		Colombia	
	Station Météo		Santa Fé de Bogota	
	Rotation	0° - 360°	0	W-E
	Fichier Climatique			Bogota_LESOSAI
	Altitude de l'ouvrage	m	2560	
GEOMETRIE	Volume	m <sup>3</sup>	2636,93	
	Volume net zone chauffée	m <sup>3</sup>	2109,54	
	Périmètre	m	57	
	Grand largeur	m	18,39	
	Petite largeur	m	9,96	
	Hauteur	m	14,4	
PHYSIQUE	Surface nette	m <sup>2</sup>	183,12	
	Capacité Thermique Bâtiment	kJ/m <sup>2</sup> K	511	
PROFIL D'OCCUPATION				
Séjour.chambre à coucher				
Personnes	Nombre	°P	142,5	108P
Appareils électriques	Puissance spécifique	W/m <sup>2</sup>	12	24,4P
éclairage	Puissance spécifique	W/m <sup>2</sup>	59,46	108,8P
REFROIDISSEMENT ET CHAUFFAGE				
	Eté - Tmax	°C	60	50
	Hiver - Tmin	°C	-30	40
VENTILATION				
	Infiltration	m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>	5,62	0,4V/h
	Ventilation nat. Par une fenêtre		pas	VdotVent 0

Table 19 Résumé paramètres surfaces

SURFACES				
Plafond	Données Générales	Inclinaison	°	0
		Surface	m <sup>2</sup>	183,12
		Situation		Contre extérieur
	Physique	Uvalue	W/m <sup>2</sup> K	5,1136
		Emissivité	%	90
		Coeff.abortion	%	90
		Réflectance d'ondes courtes	%	42
	Fenêtres	Ratio de vitrage	%	0
		Inclinaison	°	0
		Surface	m <sup>2</sup>	183,12
Plancher	Données Générales	Situation		Contre terre
		Uvalue	W/m <sup>2</sup> K	3,9474
		Kground	W/m <sup>2</sup> K	4,8
	Physique	Emissivité	%	90
		Coeff.abortion	%	90
		Réflectance d'ondes courtes	%	42
		Fenêtres	Ratio de vitrage	%
	Données Générales	Orientation	°	90 - 270
		Inclinaison	°	90
		Surface	m <sup>2</sup>	143,424
Façade Est et Ouest	Physique	Situation		Contre extérieur
		Uvalue	W/m <sup>2</sup> K	2,161
		Emissivité	%	90
		Coeff.abortion	%	90
		Réflectance d'ondes courtes	%	50
	Fenêtres	Fenêtres	Ratio de vitrage	%
		Orientation	°	0 - 180
		Inclinaison	°	90
Façade Nord et Sud	Données Générales	Surface	m <sup>2</sup>	264,82
		Situation		Contre extérieur
	Physique	Uvalue	W/m <sup>2</sup> K	2,161
		Emissivité	%	90
		Coeff.abortion	%	90
		Réflectance d'ondes courtes	%	30
	Fenêtres	Ratio de vitrage	%	40
		Surface	m <sup>2</sup>	105,93
		Largeur	cm	1248
		Hauteur	cm	849
		Vitrage simple	mm	4
		Fraction du cadre	%	30
		Gvalue	%	92
		Uglobal	W/m <sup>2</sup> K	5,87
		Stores		pas
		BlindsIrradianceCutOff	W/m <sup>2</sup> K	1385
		Fraction Ombrée	%	0

## 2.2 SIMULATIONS DES PARAMETRES DU MODELE - LESOSAI

Pour illustrer les résultats obtenus à partir des simulations des paramètres du modèle, un zoom a été fait sur une période de l'année où nous avons remarqué des différences importantes dans la température intérieure du bâtiment. La période choisie commence à partir de l'heure 4105 de l'année et termine à l'heure 4205 qui est essentiellement au milieu de l'année, du 21 au 24 juin. Dans les simulations le chauffage et le refroidissement ont été désactivés.

La Table 1 organise les simulations des paramètres les plus influents dans la dynamique des températures intérieures du bâtiment. Elle montre seulement les données prises pour LESOSAI.

Table 20 Simulations Paramètres plus influents - LESOSAI

N°	PARAMETRES	LS		Capacité Thermique du Bâtiment	Capacité Thermique du Bâtiment	Emissivité	Coeff.absorption	Infiltration	Fraction d'ombrage	Personnes	Appareils	Luminaires
		250	511									
1	Capacité Thermique du Bâtiment	250	kJ/m <sup>2</sup> K		x							
	Capacité Thermique du Bâtiment	511	kJ/m <sup>2</sup> K		x							
2	Emissivité	90	%		x	x	x					
	Coeff.absorption	90	%		x	x	x					
3	Infiltration	5,62	m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>		x	x	x	x				
4	Fraction d'ombrage	50	%		x	x	x	x	x			
6	Personnes	142,5	P		x	x	x	x		x		
7	Appareils	12	W/m <sup>2</sup>		x	x	x	x			x	
8	Luminaires	54.46	%		x	x	x	x				x
9	Occupation total		W/m <sup>2</sup>		x	x	x	x		x	x	x
	REF Sans Occupation				x	x	x	x				
	REF Avec Occupation				x	x	x	x		x	x	x

Ci-dessous nous montrons les résultats des simulations qui nous ont amené finalement à définir deux comportements thermiques de référence (le premier sans occupation et le deuxième avec occupation).

### 2.2.1. CAPACITE THERMIQUE

Dans la Figure 66 on compare les modèles avec une capacité thermique de 250 kJ/m<sup>2</sup>K et de 500 kJ/m<sup>2</sup>K. Les courbes montrent les températures extérieures, et les résultats de simulations avec des capacités thermiques différentes.

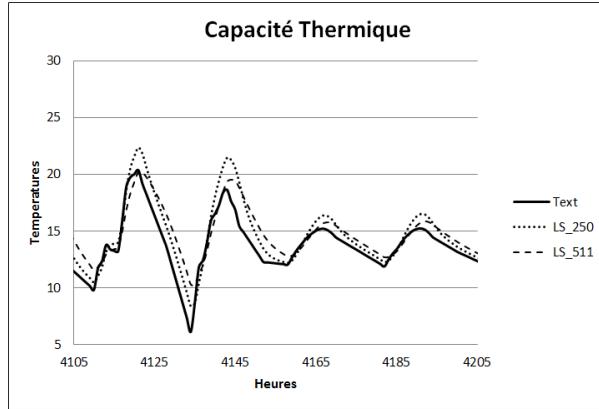


Figure 66 Températures résultantes 21 - 24 juin - Capacité Thermique

Dans les jours où il y a une variation de température plus remarquée (21 et 22 de juin) le bâtiment avec une CT plus basse se chauffe plus facilement. D'autre part le model avec une CT=511 montre une dynamique de température sans grandes variations par rapport aux températures extérieures, cela s'explique par le fait qu'une capacité thermique plus haute est équivalente à une meilleure inertie thermique.

Comme dans CitySim il n'est pas possible de modifier la capacité thermique du bâtiment car elle est calculée par défaut, il est très important d'entrer dans LESOSAI une valeur précise et la plus proche possible de la réalité afin d'assurer la simulation de modèles similaires.

### 2.2.2. EMISSIVITE ET COEFFICIENT D'ABSORPTION

Une paroi extérieure peut, de jour, capter l'énergie solaire et en transmettre une faible partie à l'intérieur du bâtiment. D'autre part, les déperditions par rayonnement vers le ciel – dont la température est en moyenne inférieure à celle de l'air ambiant – sont plus importantes que vers l'environnement immédiat. Ces deux phénomènes se compensent partiellement et la différence est généralement négligeable dans le calcul mensuel, donc souvent négligée. Dans le calcul horaire des besoins de froid ces échanges peuvent devenir importants [30].

Pour le calcul des échanges radiatifs, CitySim assume une émissivité et un coefficient d'absorption de 90% pour tous les matériaux. Ces valeurs correspondent à celles entrées dans LESOSAI (voir Figure 30, Figure 33 et Figure 36).

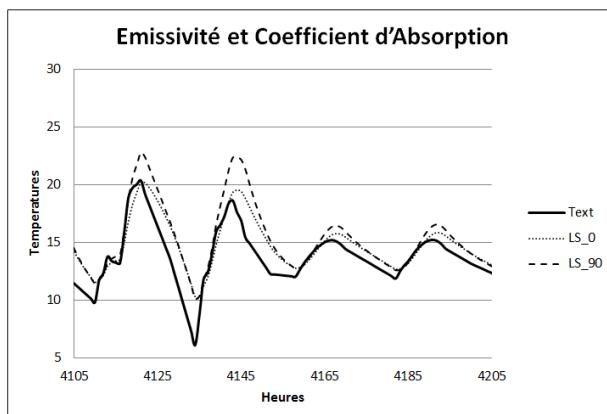


Figure 67 Températures résultantes 21 - 24 juin - Émissivité et Absorption

Les résultats du bilan radiatif fait par LESOSAI montrent qu'avec une émissivité et une absorption de 90% dans les matériaux du modèle simulé, les températures intérieures augmentent, ça veut dire que les échanges radiatifs dans le calcul horaire, et pour le cas spécifique de Bogotá, ont une influence importante sur les températures intérieures du bâtiment.

### 2.2.3. TAUX D'INFILTRATION

Le taux d'infiltration de  $5.62 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  correspond à une faible exposition au vent, cependant on arrive à percevoir dans la Figure 68 une subtile diminution dans les températures intérieures du bâtiment. L'infiltration d'air affecte le comportement thermique du bâtiment, et subséquemment on ne peut pas négliger l'influence de cette variable.

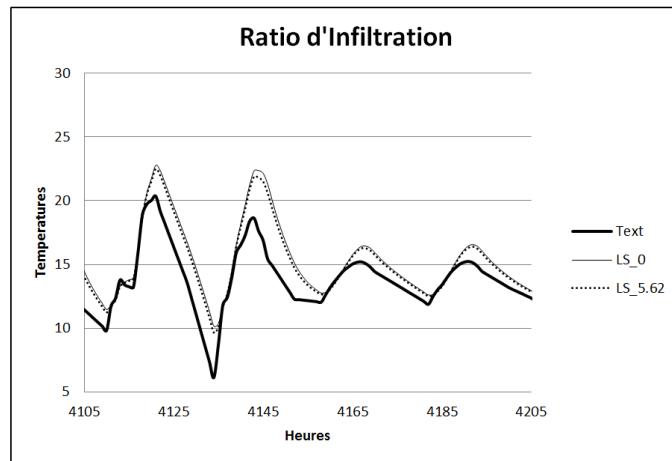


Figure 68 Températures résultantes 21 – 24 juin – Ratio d'Infiltration

### 2.2.4. FRACTION OMBREE

L'ombre est une variable importante à tenir en compte, car elle influence la quantité d'apports solaires qui peut recevoir le bâtiment. Pour l'analyse nous avons fait des simulations avec une fraction ombrée de 0% et de 50% dans les fenêtres du modèle (voir Figure 69).

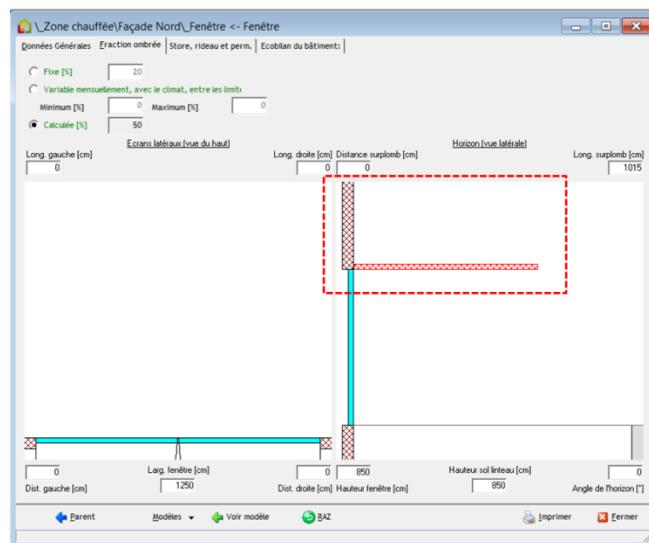


Figure 69 Fraction Ombrée de 50%

La quantité d'apports solaires reçus par les surfaces vitrées avec un facteur d'ombrage de 0% est notamment plus haute que celle des surfaces avec un facteur d'ombrage de 50%. Cette différence influe considérablement sur les températures résultantes, comme on peut le voir dans la Figure 70. Ce paramètre influence la dynamique des températures surtout pendant les moments de la journée où il y a plus de rayonnement solaire, c'est-à-dire à midi. A ce moment on peut observer des différences d'environ 2.5°C entre une courbe et une autre.

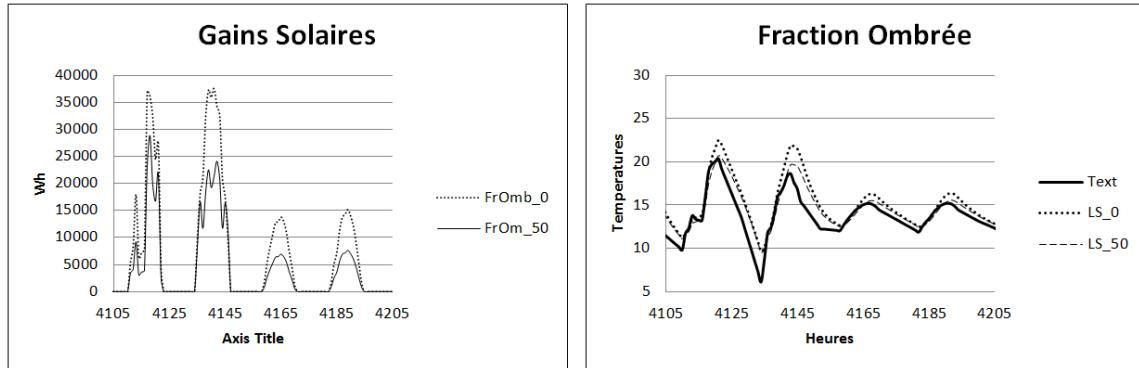


Figure 70 Températures résultantes 21 - 24 juin - Gains Solaires Surfaces Vitrées - Fraction Ombrée

## 2.2.5. PERSONNES

Le dégagement de chaleur d'une personne dépend de son activité métabolique. En fonction de l'affectation des locaux, le cahier SIA 2024 en fixe l'activité d'où découle le dégagement de chaleur des personnes. 1 met correspond à 58 W par  $\text{m}^2$  de surface de corps. Une personne « standard » a une surface de  $1.8 \text{ m}^2$ . [30].

LESOISAI, pour une activité debout inactive, assume une activité métabolique de 1.2 met. Ça veut dire qu'une personne produira une chaleur sensible d'environ 68.2 W. Sachant que LESOISAI compte 142.5 personnes, la chaleur produite par tous les occupants sera équivalente à 9718.5 W pour le nombre d'heures d'occupation maximal. Dans la Figure 71 on note l'influence de la chaleur dégagée par les personnes dans les températures résultantes.

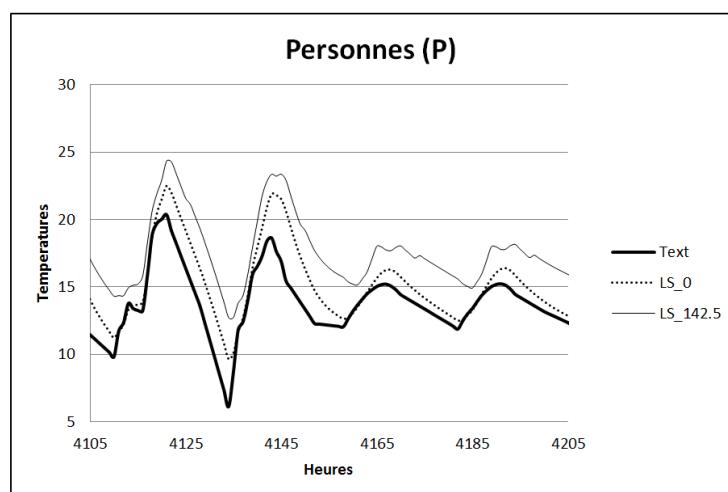


Figure 71 Températures résultantes 21 - 24 juin - Personnes

## 2.2.6. APPAREILS

La puissance spécifique calculée pour les appareils est de  $12 \text{ W/m}^2$ . C'est une valeur basse si on la compare avec la chaleur sensible dégagée par les personnes. Cependant, dans les résultats on observe une modeste influence des appareils dans le comportement thermique du bâtiment.

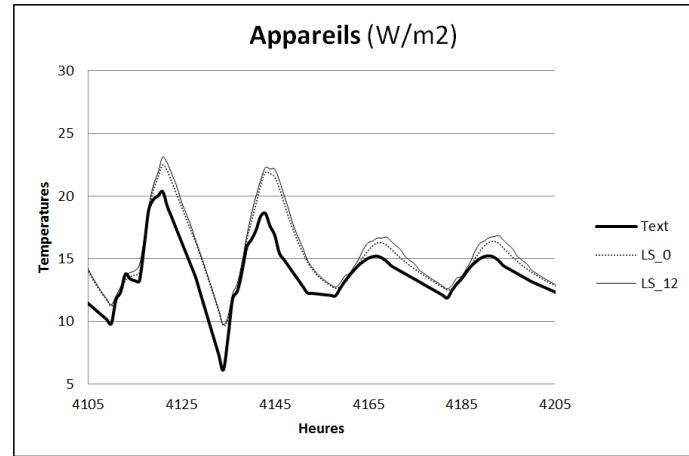


Figure 72 Températures résultantes 21 - 24 juin - Appareils

## 2.2.7. ECLAIRAGE

Pour l'éclairage une puissance spécifique de  $59.46 \text{ W/m}^2$  a été calculée. En comparaison avec ceux des appareils, les besoins énergétiques pour l'éclairage paraîtraien conséablement hauts. Néanmoins en tenant compte du profil d'utilisation de l'éclairage (voir Figure 49) l'influence sur les températures internes du bâtiment est faible.

Dans la Figure 73 on arrive à percevoir une légère modification dans les courbes de températures pendant les moments du jour où l'éclairage est utilisé, c'est-à-dire 18h à 24h.

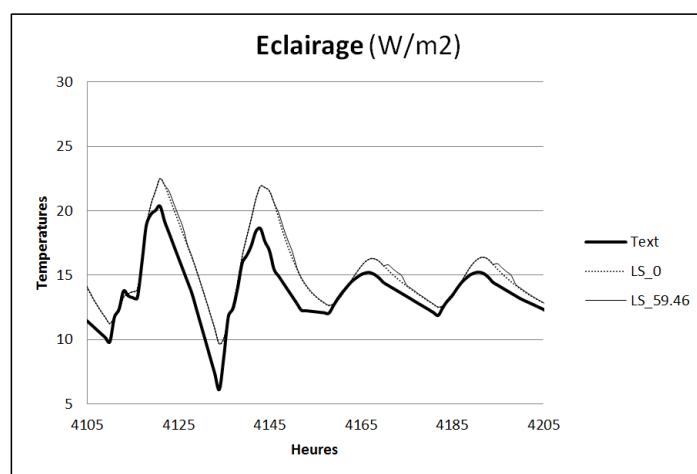


Figure 73 Températures résultantes 21 - 24 juin - Eclairage

## 2.2.8. GAINS SOLAIRES ET INTERNES

Les gains solaires sont les apports solaires passifs, essentiellement par les vitrages.

Les gains internes sont dûs aux sources de chaleur liées à l'environnement intérieur provenant des occupants, de l'éclairage et des appareils électriques.

La plupart des apports thermiques du bâtiment vient des gains solaires. Parmi les gains internes l'occupation des personnes est le paramètre qui a le plus d'influence sur les températures intérieures.

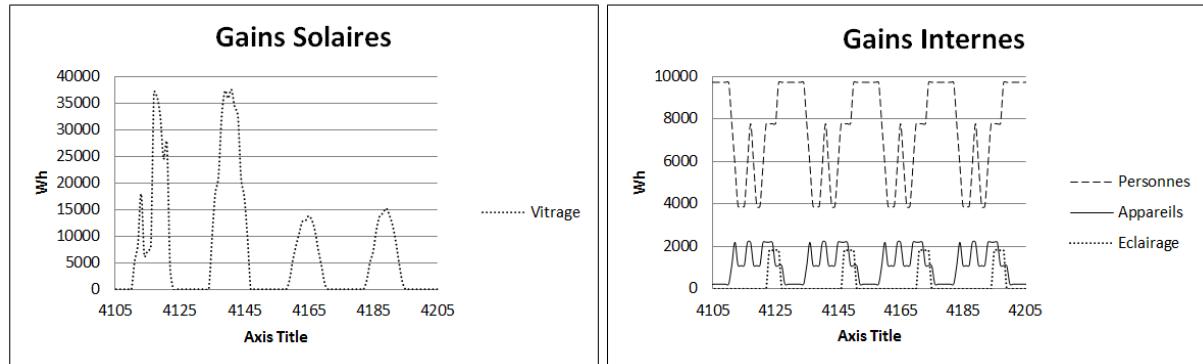


Figure 74 Apports thermiques 21 – 24 juin – Gains Solaires – Gains Internes

## 2.2.9. COURBES DE REFERENCE POUR CITYSIM

Finalement nous avons défini deux comportements thermiques de référence : le premier sans occupation (LS\_0) et le deuxième avec occupation(TOTAL).

La calibration du solveur de CitySim cherche à atteindre des comportements thermiques similaires à ceux indiqués dans la Figure 75.

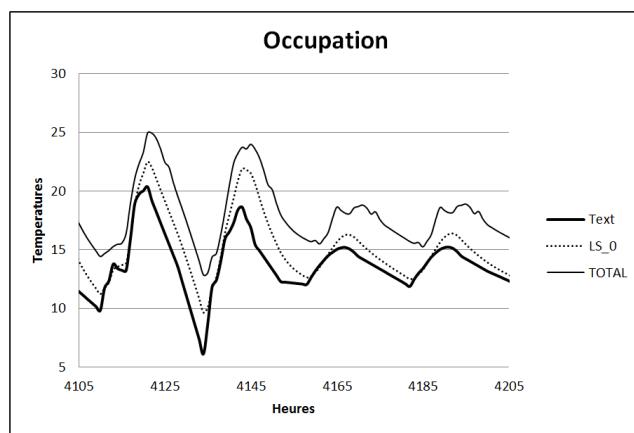


Figure 75 Températures résultantes 21 – 24 juin – Occupation

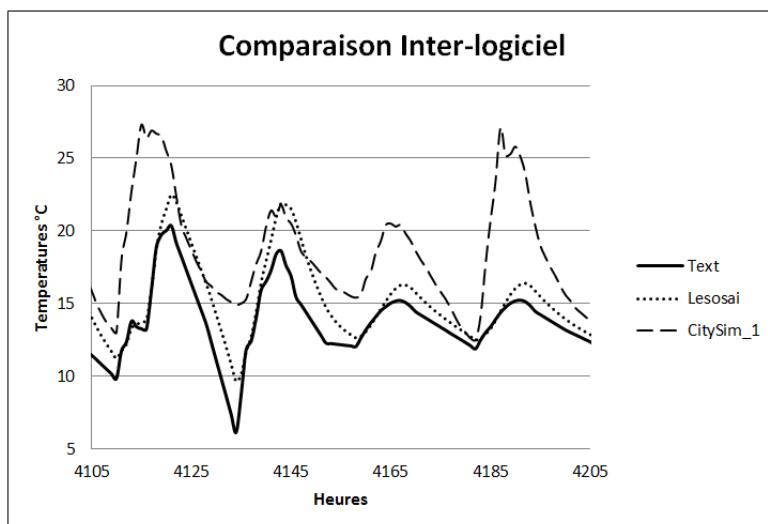
## 2.3 CALIBRATION DU SOLVEUR CITYSIM

La Table 21 montre les paramètres utilisés dans CitySim pour faire la comparaison interlogicielle. Notez que les valeurs de Capacité Thermique, Emissivité et Absorption sont données par défaut dans CitySim.

**Table 21 Simulations Paramètres pour CitySim - Interlogiciel**

N°	PARAMETRES	CS		Capacité Thermique du Bâtiment	Emissivité	Coeff.absorption	Infiltration	Fraction d'ombrage	Personnes	Appareils	Luminaires
		511	90								
1	Capacité Thermique du Bâtiment	511	kJ/m2K	x							
	Emissivité	90	%	x	x	x					
	Coeff.absorption	90	%	x	x	x					
	Infiltration	0.4	V/h	x	x	x	x				
	Fraction d'ombrage	0	%	x	x	x	x	x			
2	Personnes	108	P	x	x	x	x	x	x		
	Appareils	24.4	P	x	x	x	x			x	
	Luminaires	108.8	p	x	x	x	x				x
	Occupation total	241.2	P	x	x	x	x		x	x	x

Pour les premières simulations nous n'avons pas tenu compte des apports thermiques des occupants afin d'assurer la simulation correcte des phénomènes physiques dans les matériaux. Dans la Figure 76 les résultats de LESOSAI - REF sans occupation (voir Figure 75 et Table 20) sont comparés avec ceux obtenus par la première version de solveur de CitySim. Des différences considérables dans le comportement des températures intérieures du bâtiment sont aperçues.



**Figure 76 Comparaison 1**

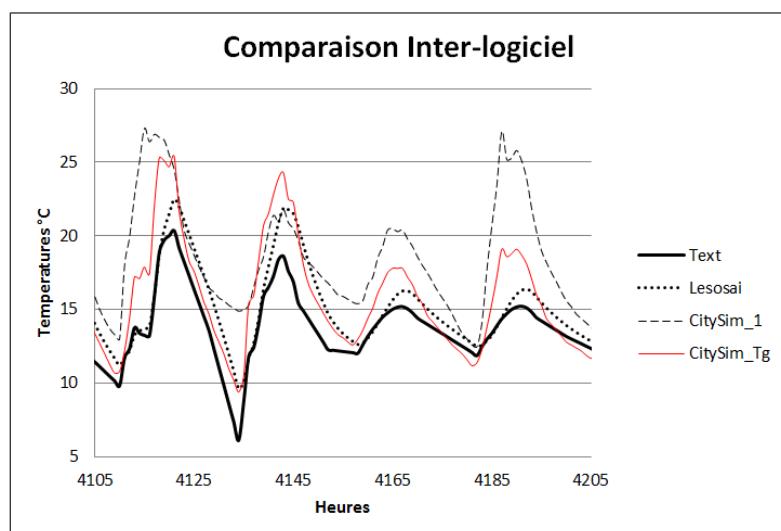
La principale cause de cet écart a été identifiée : le modèle de construction de logements sociaux ne contient pas d'isolation (comme on peut le voir dans les valeurs U de la Table 19), donc le comportement thermique des bâtiments est très sensible aux échanges infrarouges avec l'environnement. Par conséquent l'environnement radiant est d'une grande importance dans la simulation thermique et une estimation correcte des bâtiments entourant et des températures du sol est nécessaire.

Le modèle des températures du sol a été modifié afin d'utiliser des données mesurées au lieu de celles calculées. Les données des température du sol (Tground) obtenues avec MeteoNorm [31] et mises dans le fichier climatique.

**Table 22 Modification Fichier Climatique**

Bogota 4.63,-74.08,2560,-5											
dm	m	h	G_Dh	G_h	Ta	Tg	FF	DD	RH	RR	N
1	1	1	1	0	0	5.6	2.3	0.5	83	94	0
1	1	2	0	0	5.3	1.9	0.3	72	94	0	4
1	1	3	0	0	5	1.7	0.3	114	93	0	4
1	1	4	0	0	4.71	1.7	0.5	130	96	0	4
1	1	5	0	0	4.41	1.4	0.3	128	96	0	4
1	1	6	0	0	4.12	1.5	0.5	117	97	0	4
1	1	7	32.67	38.79	5.3	5.5	0.3	96	94	0	4
1	1	8	111.32	111.32	6.4	12.1	0.9	102	85	0	4
1	1	9	256.13	334.03	8.99	17.9	0.7	79	76	0	0
1	1	10	341.31	497.57	11.51	21.3	3.4	118	58	0	0
1	1	11	304.33	316.94	11.96	25.6	2.7	95	54	0	1
1	1	12	374.29	419.86	12.79	28.1	2.7	136	46	0	3
1	1	13	380.3	770.51	14.86	28.9	3.4	100	44	0	2
1	1	14	302.8	734.74	16.3	28.7	4.1	58	42	0	2
1	1	15	344.04	534.2	16.76	28.2	3.1	100	42	0	2
1	1	16	252.32	373.99	16.58	25.2	5.1	131	44	0	0
1	1	17	127.13	145.73	15.38	22.4	3.1	81	50	0	4
1	1	18	6.59	6.59	13.81	17.9	3.6	110	54	0	4
1	1	19	0	0	12.87	14.7	1.9	97	67	0	4
1	1	20	0	0	11.93	13.5	1.6	101	71	0	4
1	1	21	0	0	10.98	12.4	1.3	114	77	0	4
1	1	22	0	0	10.04	10.9	0.5	75	82	0	5
1	1	23	0	0	9.09	9.7	0.2	85	86	0	5

Comme on peut le voir dans la Figure 77, avec la modification dans le solveur (CitySim\_Tg), un comportement thermique plus semblable à celui de LESOSAI a été atteint, cependant il reste encore un décalage dans les températures résultantes.



**Figure 77 Effet de la température du sol**

Les températures résultantes de CitySim semblent ne pas tenir compte de l'effet de l'inertie thermique des murs, car les températures augmentent au même temps que celles de l'extérieur et d'ailleurs elles montrent un  $\Delta T$  plus étendu.

Pour résoudre ce problème, une dernière adaptation du solveur a été effectuée afin de distribuer l'inertie thermique des nœuds de température d'air et des murs en fonction de la profondeur de pénétration d'une variation harmonique de 24 heures dans le béton des murs, tel que calculé avec l'Equation 15.

**Equation 15 Profondeur de Pénétration**

$$\delta_e = \sqrt{\frac{\lambda * T}{p * Cp * \pi}}$$

Où

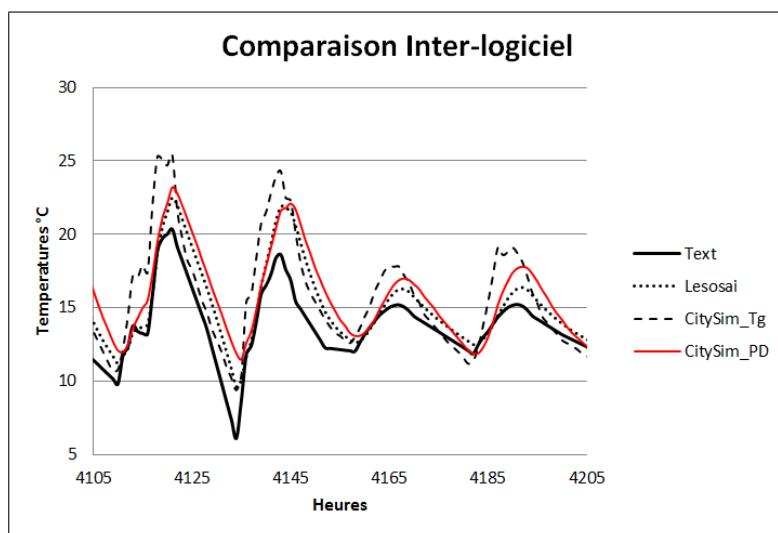
$\lambda$ = Conductivité (W/m·K)

$T$ = Période (24·3600 s)

$p$ = Densité (kg/m<sup>3</sup>)

$Cp$ = Chaleur spécifique (J/kg·K)

La Figure 78 montre les variations dans les résultats thermiques avec le dernier ajustement du solveur (CitySim\_PD). Un comportement thermique plus similaire à celui de LESOSAI peut désormais être obtenu avec CitySim.



**Figure 78 Effet Profondeur de pénétration**

### 2.3.1. SIMULATIONS AVEC OCCUPANTS

Pour évaluer l'effet des apports thermiques internes nous avons effectué des simulations séparées pour les personnes, les appareils et l'éclairage. Les résultats ont été comparés avec la courbe sans occupants obtenue avec le dernier ajustement du solveur (CitySim\_PD), et avec la courbe respective de LESOSAI (avec LS\_Personnes, LS\_Appareils et LS\_Eclairage).

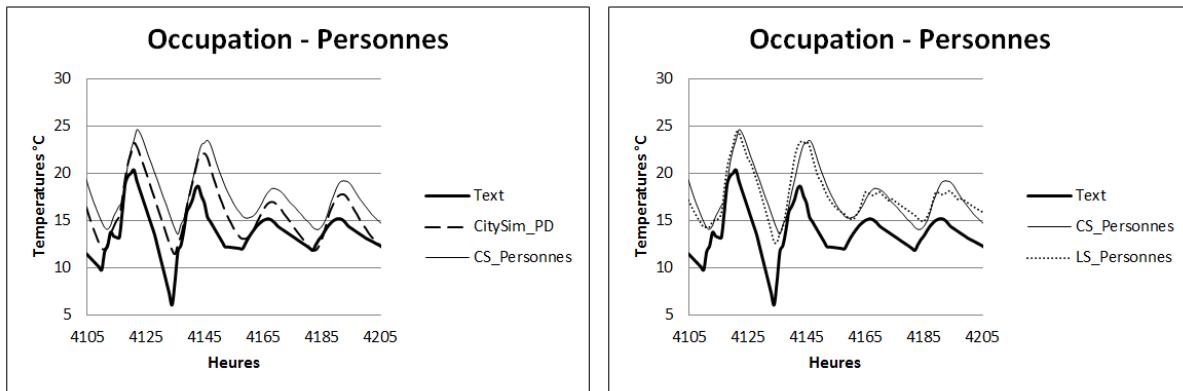


Figure 79 Effet des occupants

Dans le Figure 79 on aperçoit une augmentation des températures internes du bâtiment, avec une moyenne d'environ 1°C. Dans la comparaison avec LESOSAI on remarque un petit décalage entre les températures obtenues de chaque logiciel.

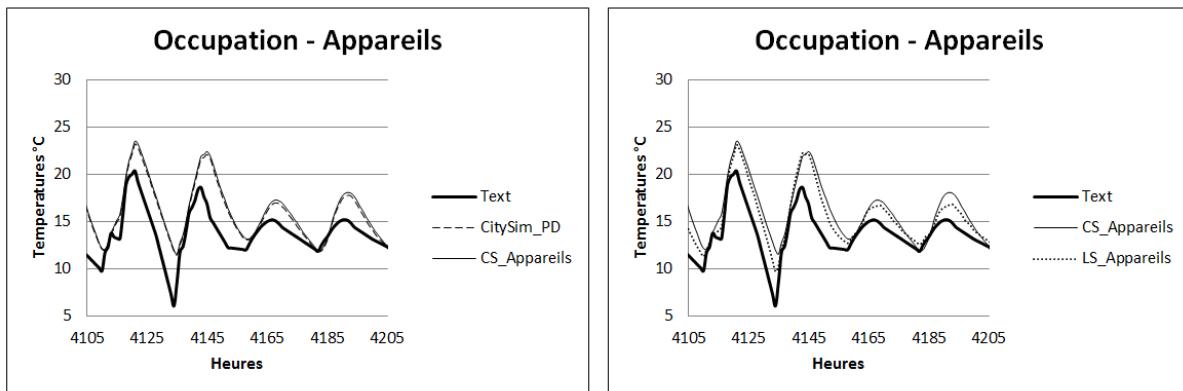


Figure 80 Effet des appareils

Comme on peut le voir dans la Figure 74 les apports thermiques produits par les appareils sont très bas. Cela on le constate dans la Figure 80 : La courbe de température montre un décalage infime en comparaison avec celle de CitySim sans occupants. En ce qui concerne la comparaison interlogiciels, il y a également un décalage entre les résultats de CitySim et ceux de LESOSAI.

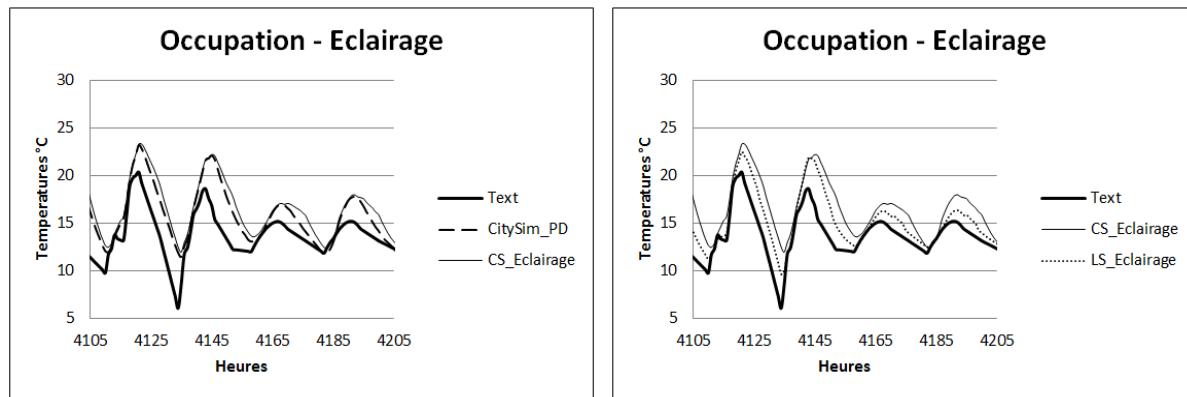


Figure 81 Effet de l'éclairage

Dans la comparaison avec la courbe de CitySim sans occupants (Figure 81-gauche), on peut voir clairement l'effet de l'éclairage dans les températures internes, qui montent au moment de la journée où l'éclairage est enclenché. Dans la comparaison inter-logiciels il y a encore un décalage évident entre les courbes de LESOSAI et celles de CitySim.

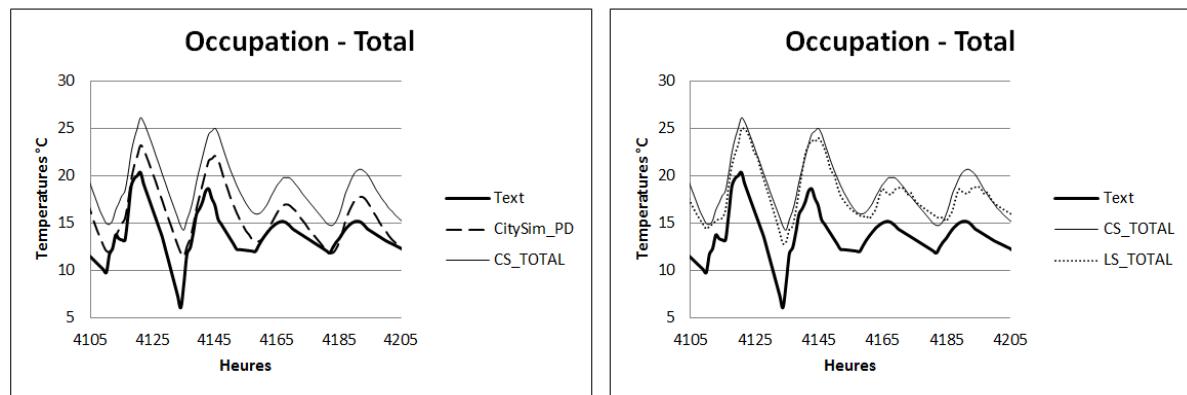


Figure 82 Effet des occupants, appareils et éclairage dans les températures internes

L'occupation totale avec l'effet des personnes, des appareils et de l'éclairage fait augmenter les températures en moyenne de 2.5°C. En termes de confort l'occupation aura un effet significatif sur les températures résultantes (voir Figure 82 – gauche). Quand on compare les courbes avec l'occupation totale de CitySim et LESOSAI on peut voir un comportement thermique dynamique pareil, cependant il n'est pas encore exacte.

Finalement pour vérifier la cause du décalage trouvé, nous avons comparé les gains internes obtenus par LESOSAI et CitySim (voir Table 23). Dans la comparaison nous avons remarqué que les gains internes obtenus par des simulations sur LESOSAI ne sont pas les mêmes à ceux qui sont montrés dans le résumé de gains internes donné dans le Figure 52. Dans les résultats des personnes et appareils nous avons trouvé un facteur constant de 0.8 entre les résultats, et dans ceux de l'éclairage le facteur est approximé à 0.19.

Table 23 Comparaison de Gains Internes – LESOSAI - CitySim

Heures	LS_Qs	CS_Qs	LS/CS	LS_Papp	CS_Papp	LS/CS	LS_Pecl	CS_Pecl	LS/CS
	Wh	Wh		Wh	Wh		Wh	Wh	
1.00	7774.71	9720.00	0.80	175.80	0.00		0.00	0.00	
2.00	7774.71	9720.00	0.80	175.80	0.00		0.00	0.00	
3.00	7774.71	9720.00	0.80	175.80	0.00		0.00	0.00	
4.00	7774.71	9720.00	0.80	175.80	0.00		0.00	0.00	
5.00	7774.71	9720.00	0.80	175.80	0.00		0.00	0.00	
6.00	7774.71	9720.00	0.80	175.80	0.00		0.00	0.00	
7.00	6219.77	7776.00	0.80	878.98	1098.00	0.80	0.00	0.00	
8.00	4664.83	5832.00	0.80	1757.95	2196.00	0.80	0.00	0.00	
9.00	3109.88	3888.00	0.80	878.98	1098.00	0.80	0.00	0.00	
10.00	3109.88	3888.00	0.80	878.98	1098.00	0.80	0.00	0.00	
11.00	3109.88	3888.00	0.80	878.98	1098.00	0.80	0.00	0.00	
12.00	4664.83	5832.00	0.80	1757.95	2196.00	0.80	0.00	0.00	
13.00	6219.77	7776.00	0.80	1757.95	2196.00	0.80	0.00	0.00	
14.00	4664.83	5832.00	0.80	878.98	1098.00	0.80	0.00	0.00	
15.00	3109.88	3888.00	0.80	878.98	1098.00	0.80	0.00	0.00	
16.00	3109.88	3888.00	0.80	878.98	1098.00	0.80	0.00	0.00	
17.00	4664.83	5832.00	0.80	1757.95	2196.00	0.80	0.00	0.00	
18.00	6219.77	7776.00	0.80	1757.95	2196.00	0.80	1815.00	9792.00	0.19
19.00	6219.77	7776.00	0.80	1757.95	2196.00	0.80	1815.00	9792.00	0.19
20.00	6219.77	7776.00	0.80	1757.95	2196.00	0.80	1815.00	9792.00	0.19
21.00	6219.77	7776.00	0.80	878.98	1098.00	0.80	1815.00	9792.00	0.19
22.00	7774.71	9720.00	0.80	878.98	1098.00	0.80	1815.00	9792.00	0.19
23.00	7774.71	9720.00	0.80	878.98	1098.00	0.80	0.00	0.00	
24.00	7774.71	9720.00	0.80	175.80	220.00	0.80	0.00	0.00	

En conséquence, pour obtenir des résultats similaires nous avons modifié les occupants pour CitySim en multipliant les résultats de puissance obtenus par les facteurs trouvés (voir Table 24, Table 25 et Table 26)

Table 24 Modification Occupants pour CitySim - Personnes

Heures	Taux d'occupation	PERSONNES			MODIFICATION			
		Personnes	Personnes selon taux d'occupation	Puissance par personne	Puissance selon taux	Facteur	Puissance selon taux	Occupantes pour CitySim
				W/P	W		W	W/90WP
1	1	108	108	108.00	90.00	0.8	7776	86.4
2	1			108.00			7776	86.4
3	1			108.00			7776	86.4
4	1			108.00			7776	86.4
5	1			108.00			7776	86.4
6	1			108.00			7776	86.4
7	0.8			86.40			6220.8	69.12
8	0.6			64.80			4665.6	51.84
9	0.4			43.20			3110.4	34.56
10	0.4			43.20			3110.4	34.56
11	0.4			43.20			3110.4	34.56
12	0.6			64.80			4665.6	51.84
13	0.8			86.40			6220.8	69.12
14	0.6			64.80			4665.6	51.84
15	0.4			43.20			3110.4	34.56
16	0.4			43.20			3110.4	34.56
17	0.6			64.80			4665.6	51.84
18	0.8			86.40			6220.8	69.12
19	0.8			86.40			6220.8	69.12
20	0.8			86.40			6220.8	69.12
21	0.8			86.40			6220.8	69.12
22	1			108.00			7776	86.4
23	1			108.00			7776	86.4
24	1			108.00			7776	86.4

Table 25 Modification Occupants pour CitySim – Appareils

Heures	Taux d'utilisation	Puissance Spécifique	APPAREILS				MODIFICATION		
			Puissance taux d'occupation	Surface Nette	Puissance selon taux	Occupants pour CitySim	Facteur	Puissance selon taux	Occupantes pour CitySim
								W	W/90WP
1	0	12.00	12.00	183.12	0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.5				6	1098.72	12.21	878.98	9.77
8	1				12	2197.44	24.42	1757.95	19.53
9	0.5				6	1098.72	12.21	878.98	9.77
10	0.5				6	1098.72	12.21	878.98	9.77
11	0.5				6	1098.72	12.21	878.98	9.77
12	1				12	2197.44	24.42	1757.95	19.53
13	1				12	2197.44	24.42	1757.95	19.53
14	0.5				6	1098.72	12.21	878.98	9.77
15	0.5				6	1098.72	12.21	878.98	9.77
16	0.5				6	1098.72	12.21	878.98	9.77
17	1				12	2197.44	24.42	1757.95	19.53
18	1				12	2197.44	24.42	1757.95	19.53
19	1				12	2197.44	24.42	1757.95	19.53
20	1				12	2197.44	24.42	1757.95	19.53
21	0.5				6	1098.72	12.21	878.98	9.77
22	0.5				6	1098.72	12.21	878.98	9.77
23	0.5				6	1098.72	12.21	878.98	9.77
24	0.1				1.2	219.74	2.44	175.80	1.95

Table 26 Modification Occupants pour CitySim – Éclairage

Heures	Taux d'utilisation	Puissance Spécifique	ÉCLAIRAGE				MODIFICATION		
			Puissance taux d'occupation	Surface Nette	Puissance selon taux	Occupants pour CitySim	Facteur	Puissance selon taux	Occupantes pour CitySim
								W	W/90WP
1	0	53,47W/m <sup>2</sup>	53,47W/m <sup>2</sup>	183.12m <sup>2</sup>	0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
18	1				53.47	9791.43	108.79	1815.33	20.17
19	1				53.47	9791.43	108.79	1815.33	20.17
20	1				53.47	9791.43	108.79	1815.33	20.17
21	1				53.47	9791.43	108.79	1815.33	20.17
22	1				53.47	9791.43	108.79	1815.33	20.17
23	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0				0	0.00	0.00	0.00	0.00

Finalement nous avons calculé la somme de toutes les puissances à l'aide de l'équation suivante :

Equation 13 Calcul pour profile d'occupation total

$$T_{tot} = \frac{Qs + Papp + Pecl}{90 W/P} \frac{Nmax}{Nmax}$$

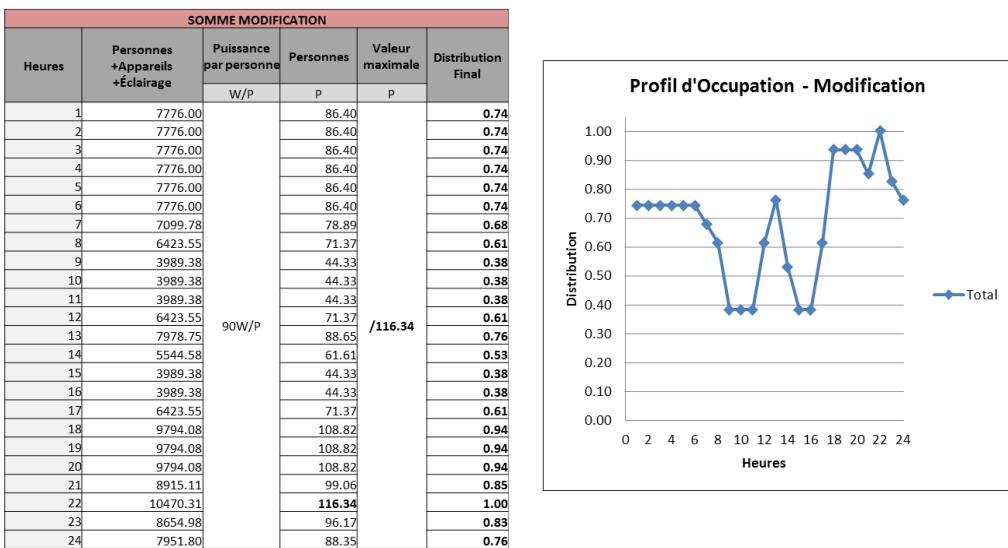


Figure 83 Calcul de distribution finale - Profil d'occupation finale avec la modification

De cette manière nous avons obtenu le nombre maximum d'occupants et le profil d'occupation dont nous devons tenir compte dans CitySim pour étudier l'effet des personnes, des appareils et de l'éclairage sur les températures du bâtiment. Les modifications ont été faites dans le fichier .xml (voir Figure 84)

Figure 84 Fichier .xml – Nouveaux occupants et profile pour CitySim

Dans la Figure 85 les résultats obtenus avec cette modification semblent un peu plus pareils à ceux de LESOSAI. Désormais il est possible de faire les simulations du cas d'étude avec plus de confiance dans les résultats.

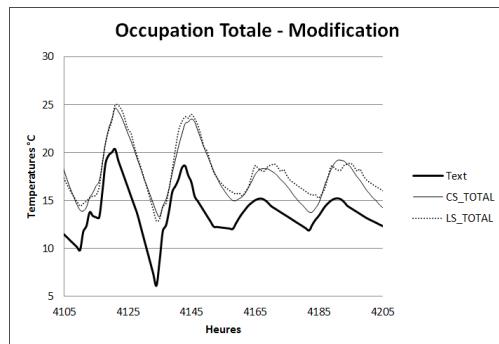


Figure 85 Occupation Totale avec modification des occupants

### 3.0 INDICATEUR D'INCONFORT THERMIQUE

Cette étude vise à quantifier l'influence de la densité urbaine sur les conditions thermiques internes des logements sociaux à Bogotá, la capitale de Colombie. Pour quantifier cette influence nous avons défini un indicateur d'inconfort thermique basé sur la charte bioclimatique de Givoni pour Bogotá (Figure 86) qui prédit les conditions intérieures du bâtiment selon les conditions extérieures et les met en relation avec des stratégies architectoniques [35].

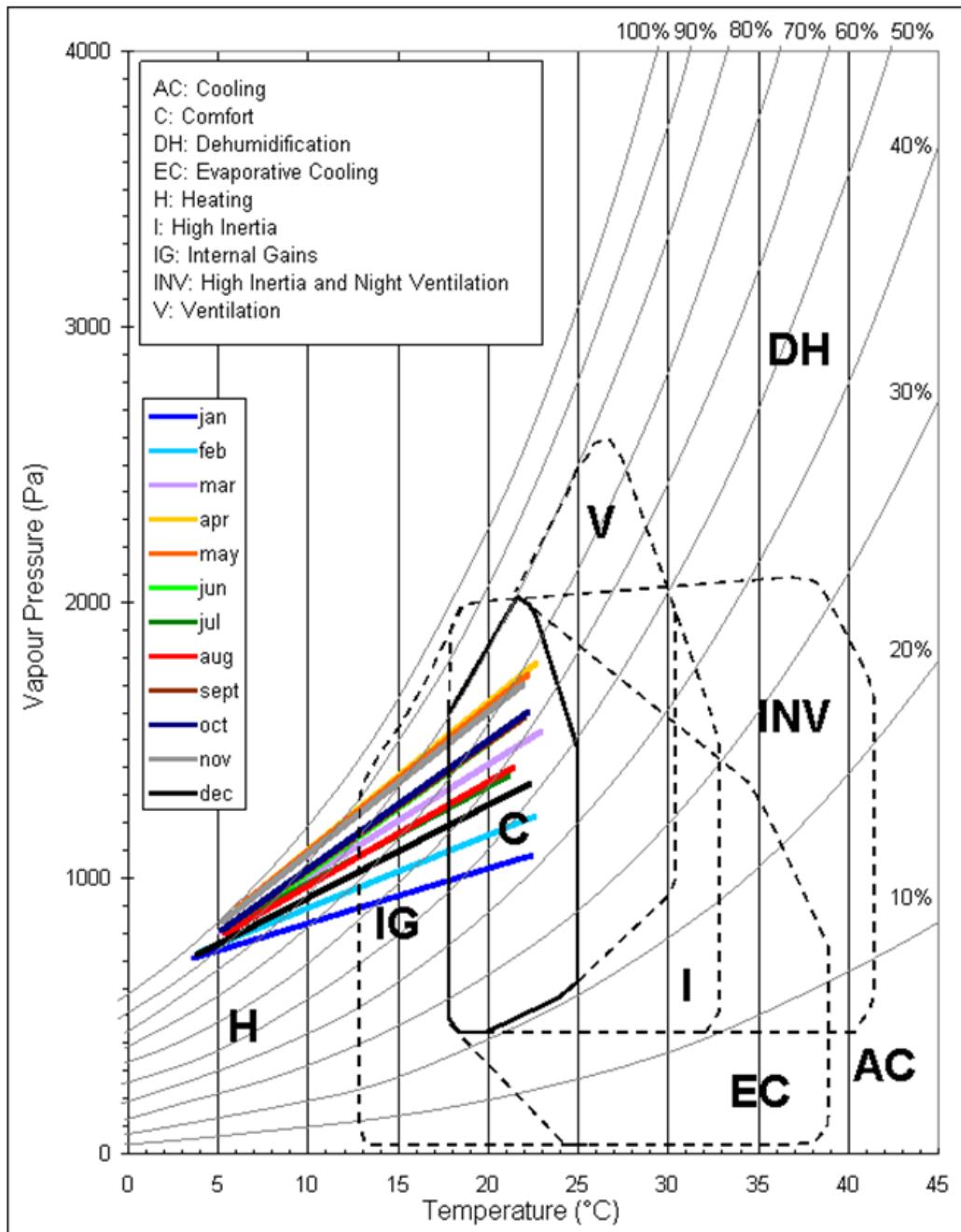


Figure 86 Charte bioclimatique de Givoni pour Bogotá [33]

Selon la charte, à Bogotá la zone de confort est encadrée dans un rang de températures entre 18°C et 25°C et d'humidité relative entre 20% et 80%.

## VÉRIFICATION DE L'HUMIDITÉ RELATIVE INTÉRIEURE

Pour constater que les valeurs d'humidité relative à l'intérieur du bâtiment étaient à l'intérieur du rang de confort, nous avons effectué les calculs suivantes :

D'abord la pression de vapeur d'eau à saturation a été calculée, pour chaque heure d'une année complète, en appliquant l'équation de Clausius-Clapeyron :

**Equation 16 Pression de vapeur d'eau à saturation**

$$psat = (6.11 * 10.00^{\frac{7.5*t}{237.7+t}}) * 100$$

Où

Psat= Pression de vapeur d'eau à saturation (N/m<sup>2</sup>)

t= Température d'air (°C)

Après nous avons défini l'humidité absolue à la saturation de vapeur avec la formule suivante :

**Equation 17 Humidité absolue à la saturation de vapeur**

$$Has = \frac{psat}{0.4617 * t}$$

Où

Has= Humidité absolue à la saturation de vapeur d'eau (g/m<sup>3</sup>)

Psat= Pression de vapeur d'eau à saturation (N/m<sup>2</sup>)

t= Température d'air (K)

*Note :* Tous les calculs ont été faits en utilisant les valeurs horaires de température extérieure de MeteoNorm et celles de température intérieure obtenues par les simulations du modèle.

Ensuite, nous avons calculé l'humidité absolue extérieure avec :

**Equation 18 Humidité absolue**

$$Ha = Has * Hr$$

Où

Ha= Humidité absolue (g/m<sup>3</sup>)

Has= Humidité absolue à la saturation de vapeur d'eau (g/m<sup>3</sup>)

Hr= Humidité Relative (%)

Dans ce cas, les valeurs d'humidité relative extérieure ont été prises du fichier climatique de MeteoNorm

Finalement, nous avons calculé l'humidité relative intérieure du bâtiment de la manière suivante :

**Equation 19 Humidité Relative intérieure**

$$Hr = \frac{Ha}{Has}$$

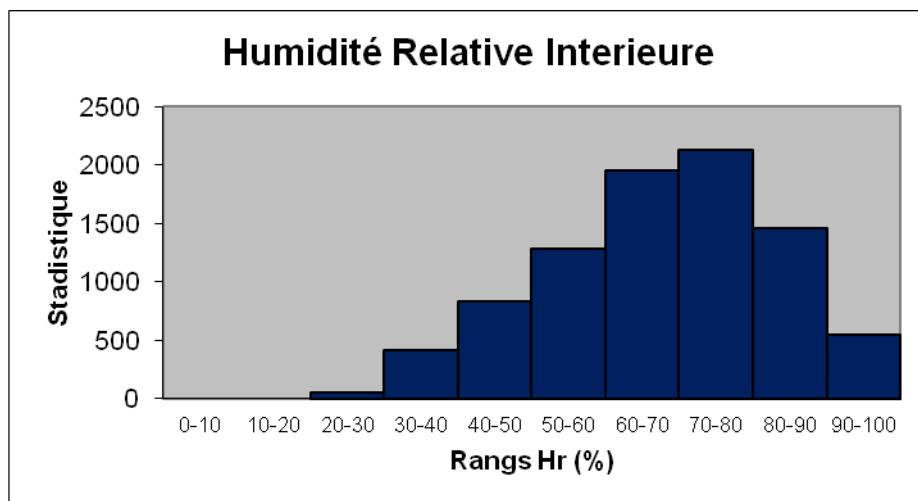
Où

$Hr$ = Humidité relative intérieure (%)

$Ha$ = Humidité absolue extérieure ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$Has$ = Humidité absolue à la saturation de vapeur d'eau ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

Les résultats obtenus pour les 8760 heures de toute l'année, sont montrés dans la Figure 87, où on constate que la plupart des valeurs se trouvent à l'intérieur d'une zone de 60% à 80% d'humidité relative. Cela veut dire que les valeurs d'humidité respectent le rang de confort défini d'après la charte bioclimatique de Givoni.



**Figure 87 Résultats Humidité relative intérieure dans le modèle simulé**

## TEMPÉRATURE INTÉRIEURE – INDICATEUR

Pour définir un indicateur d'inconfort thermique qui prend en compte la variation dynamique de la température intérieure du bâtiment pour chaque heure d'une année complète, nous avons calculé à partir de l'Equation 20 le nombre de degrés-heures nécessaires de chauffage hypothétique (pour atteindre 18°C) et de refroidissement hypothétique (pour atteindre 25 °C).

**Equation 20 Dégrés Heure pour chauffage et refroidissement**

$$DH = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} [\max(18 - T_i, 0) + \max(T_i - 25, 0)]$$

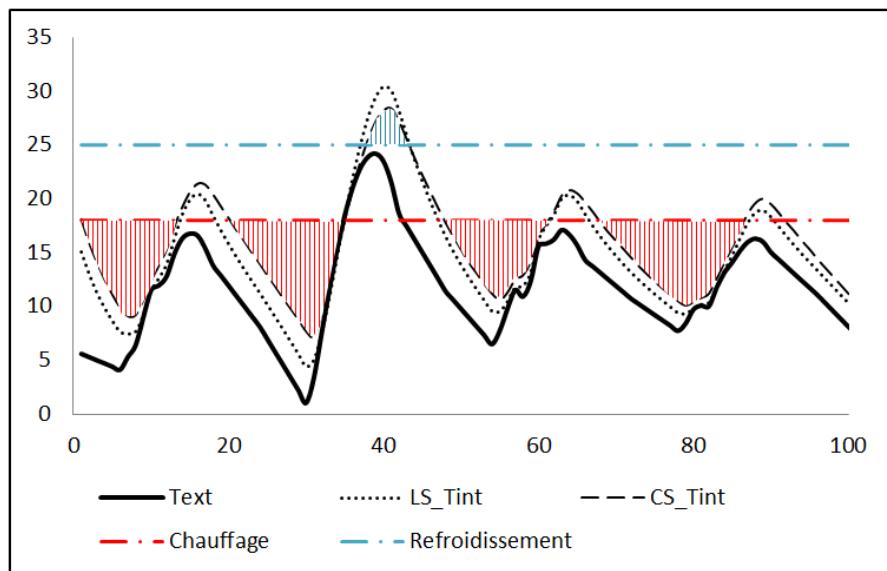


Figure 88 Premiers 4 jours de l'année – Dégrées heure pour chauffage et refroidissement hypothétiques

Le résultat est la moyenne annuelle de Dégrées-Heures (DH) à l'extérieur de la zone de confort définie, pendant les 8760 heures de l'année.

Une échelle de DH=0 à DH=5 a été fixée où :

DH=0 signifie températures internes pendant toute l'année dans la zone de confort,

DH=1 signifie températures internes la plupart de l'année 1°C en dehors de la zone de confort, et

DH=5 signifie températures internes la plupart de l'année 5°C en dehors de la zone de confort.

Dans cette échelle jusqu'à une DH=2 est considéré comme une différence acceptable, et une DH entre 2 et 5 une différence inacceptable.

0	Confort
1	
2	
3	Inconfort
4	
5	

Figure 89 Echelle Dégrées-Heure – Indicateur d'inconfort

## 4.0 CAS D'ÉTUDE

Le projet « Las Huertas », un quartier de logement social situé au Sud de Bogotá ( $4^{\circ}63'$ ,  $-74^{\circ}08'$ ) a été choisi comme étude de cas pour deux raisons principales:

Tout d'abord, parce que c'est un macro-projet qui suit les règlements actuels de logements sociaux lesquels encouragent la construction « d'un plus grand nombre de maisons dans la surface de terrain disponible » [17], raison pour laquelle ce quartier a une haute densité qui cherche à fournir des logements à environ 18'000 familles pauvres. Cette condition spécifique nous permet de mieux comprendre le problème de la densité urbaine dans les projets de logement social et de concevoir une méthodologie d'étude en fonction de la situation réelle.

Deuxièmement parce qu'on avait accès à la plupart des informations du projet, fournies par les dessinateurs[32].

### 4.1. CONTEXTE DU PROJET

Le projet Las Huertas se localise à Bogotá, la capitale de Colombie, plus exactement dans la périphérie de la partie métropolitaine. Au sud il jouxte la municipalité de Soacha, et au nord le macro-projet Ciudad Verde. Il se trouve près de l'autoroute du Sud, ce qui rend plus facile la connectivité avec la ville.

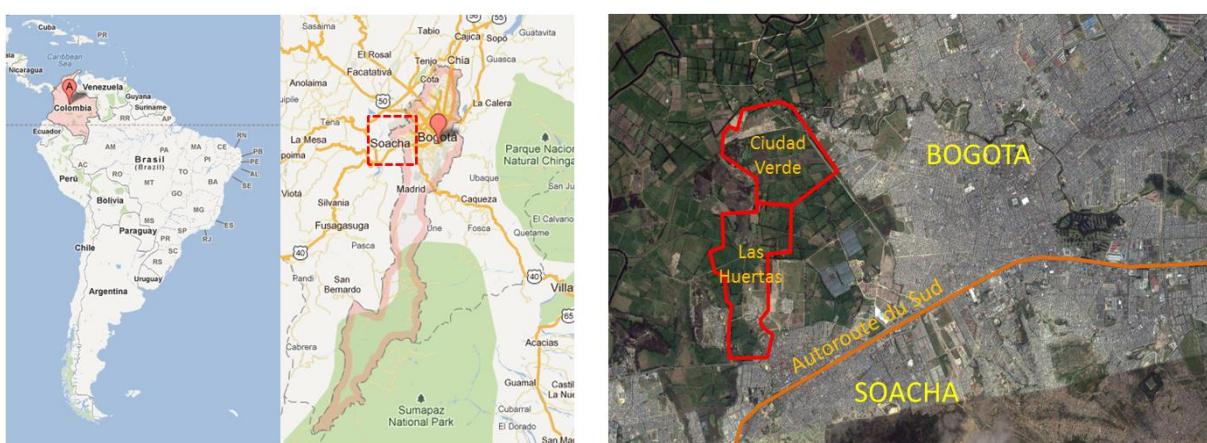


Figure 90 Localisation Las Huertas

Le macro-projet (Figure 91) est composé par 26 super-parcelles et 58 lots discriminés de la manière suivant :

- 53 lots de logement avec commerce
- 3 lots commerciaux
- 1 lot avec activité multiple
- 1 lot de réserve pour héritage

Le macro-projet propose aussi 15 zones de parcs, 3 zones de réserve environnementale, et 3 zones spéciales pour des équipements urbaines. La surface totale du projet est de 990'071,48 m<sup>2</sup> (99ha). Le but du projet est de fournir des logements à un nombre approximatif de 18'000 familles. Alors si on estime une moyenne de 4.5 personnes par famille[15], la densité humaine du projet complet serait de 818 personnes/ha.

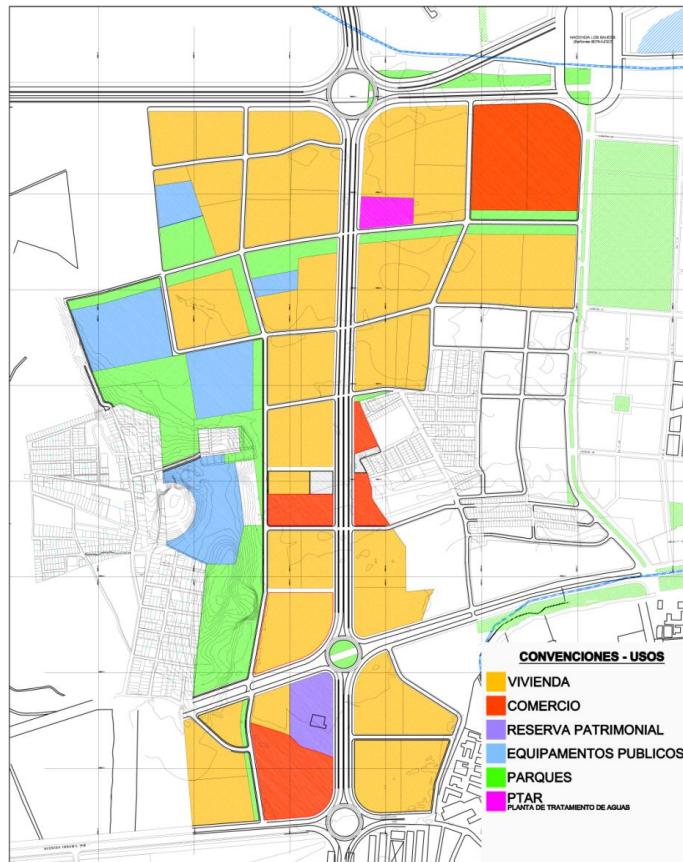


Figure 91 Macro-projet Las Huertas

Le développement urbain de Las Huertas a été organisé en 5 étapes (Figure 92). Nous avons choisi comme cas d'étude seulement 3 lots de la première étape (Figure 93).

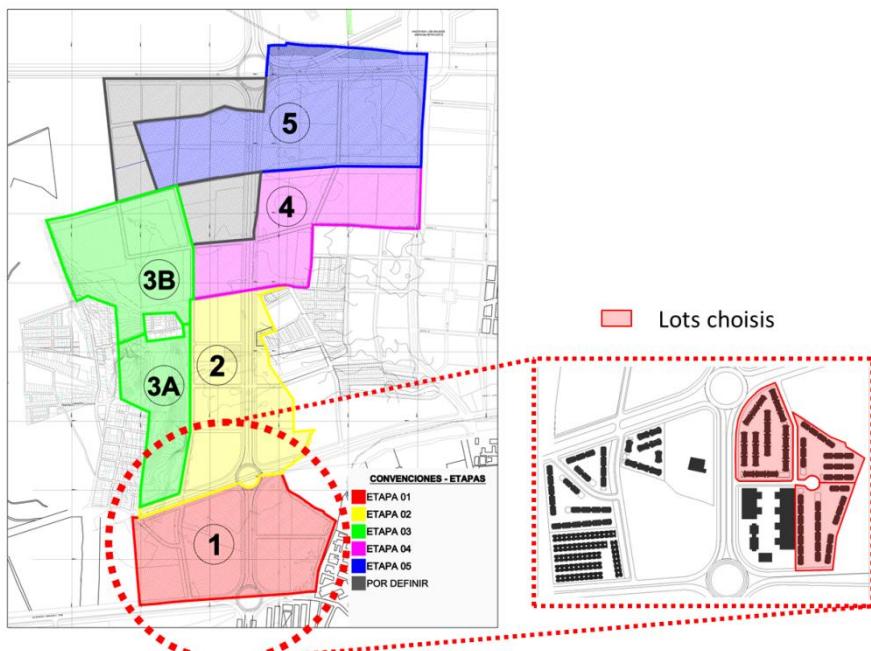


Figure 92 Etapes Las Huertas

## 4.2. DENSITES URBAINES – 3 CAS D'ÉTUDE

Les lots choisis ont une surface de terrain totale de 3.88 ha dans laquelle ont été placés 60 bâtiments rangés qui vont loger à peu près 6480 personnes. Cela veut dire que, si on prend seulement les 3 lots choisis, la densité humaine de cette partie du macro-projet est de 1670 Hab/ha (voir Table 27).

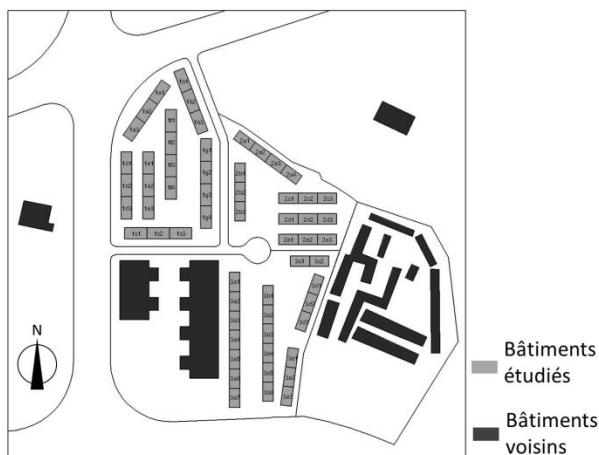


Figure 93 Cas d'étude – 3 lots macro-projet Las Huertas

Table 27 Paramètres de densité case de référence

Surface occupé	Surface Terrain	Surface construit	Logements	Habitants	Densité Humaine
m <sup>2</sup>	ha	m <sup>2</sup>		4.5 per/log	hab./ha
11914,33	3,88	71485,98	1440,00	6480	1670

La Figure 94 donne une référence pour comprendre le concept de densité humaine. Il est évident que la densité humaine des lots choisis est très haute si on la compare avec celle des îlots denses à Lausanne. Cela s'explique par les dynamiques socio-économiques des pays en voie de développement, qui comportent des déficits quantitatifs de logements et également la construction de quartiers à très haute densité humaine.

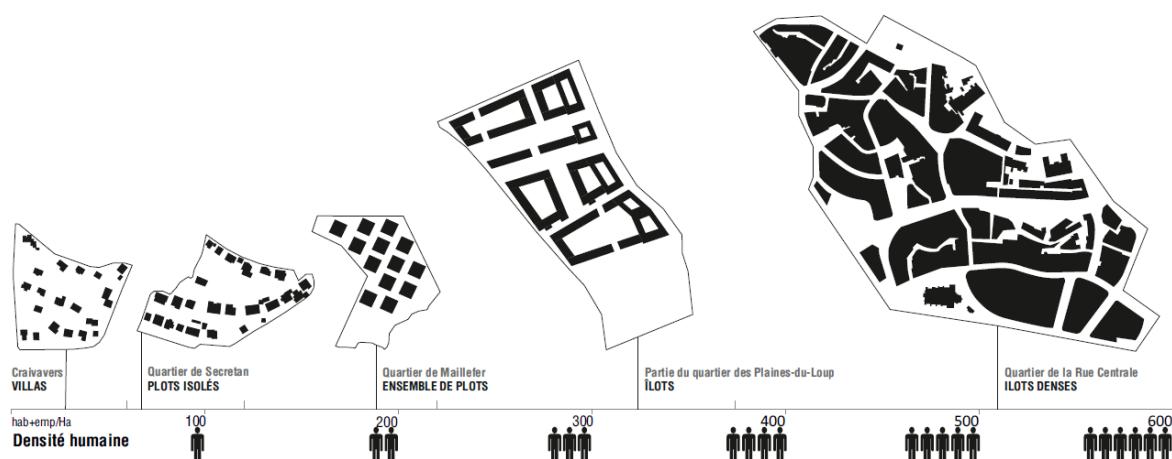


Figure 94 Comparaison de différentes densités humaines de quartiers de Lausanne [36]

Or, pour identifier des solutions qui peuvent conduire à l'adéquat développement de logements sociaux à Bogotá, nous avons considéré le problème du déficit quantitatif (qui encourage des établissements à haute densité) en étudiant trois scénarios urbains différents avec distincts coefficients d'occupation de sol (COS), mais avec le même coefficient d'utilisation de sol (CUS), ça veut dire que la densité humaine est la même pour les trois cas. Pour conserver le même CUS les hauteurs des bâtiments ont été modifiées (voir Table 28).

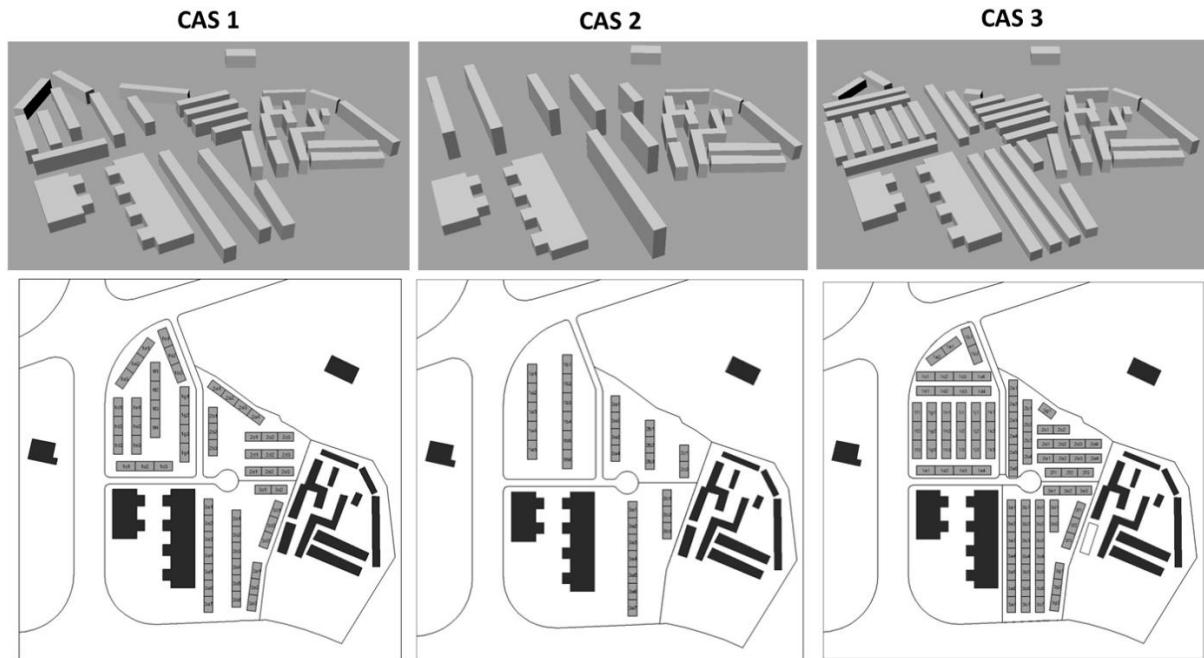


Figure 95 Représentation 3D et 2D de 3 cas d'étude

Table 28 Paramètres de densité de trois cas d'étude

Cas	Nombre de Bâtiments	Hauteur de Bâtiments	COS	CUS	Densité Humaine
		m	Surface occupé de bâtiment / surface terrain	Total floor area / site area	Hab./ha
1	60,00	14,40	0.30	1.84	1670
2	30,00	28,80	0.15		
3	90,00	9,60	0.46		

Pour simuler et analyser les cas d'étude nous avons énuméré les bâtiments selon le lot et la rangée (Figure 96).

Par exemple dans « 2c1 »

- « 2 » c'est le nombre du lot
- « c » c'est le nom de la rangée
- « 1 » c'est le nombre du bâtiment dans la rangée



Figure 96 Énumération de bâtiments dans – Exemple cas 1

#### 4.2.1. OBSTRUCTIONS HORIZONTALES ET VERTICALES

Au milieu urbain les bâtiments se font de l'ombre à cause des obstructions solaires verticales et horizontales. Les obstructions verticales affectent l'irradiation provenant de haut, et celles horizontales affectent l'irradiation provenant des côtés [23].

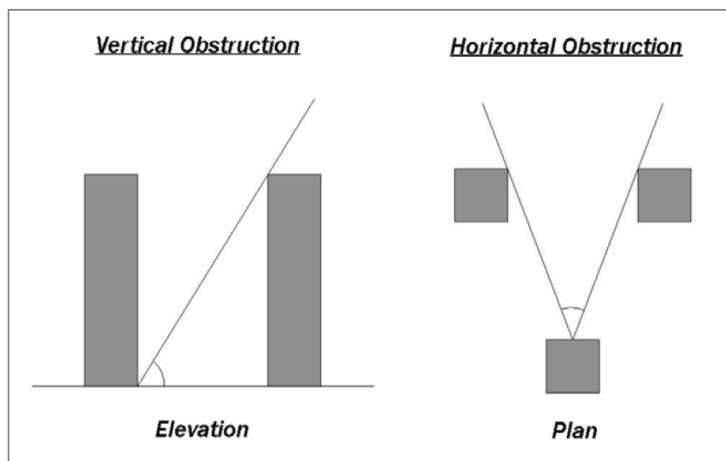


Figure 97 Obstruction Verticale et Horizontale [23]

Dans l'étude nous comparons trois cas avec de différentes densités urbaines et différentes dispositions des bâtiments, ce qui entraîne distinctes options d'obstruction, comme on peut le voir dans l'explication ci-dessus :

**Le cas 1** est le cas de base qui correspond à la réalité du projet. Tous les bâtiments ont une hauteur de 6 étages, mais les distances entre eux changent, la plus petite étant de 8.41m, et la plus grande de 23.05m. L'angle d'obstruction verticale qui affecte l'éclairement énergétique venant de haut varie de 32° à 61° (voir Figure 99 ).

Les angles d'obstruction horizontale les plus petits ont été soulignés dans la Figure 98 ci-dessus. Les angles sont de 19°.

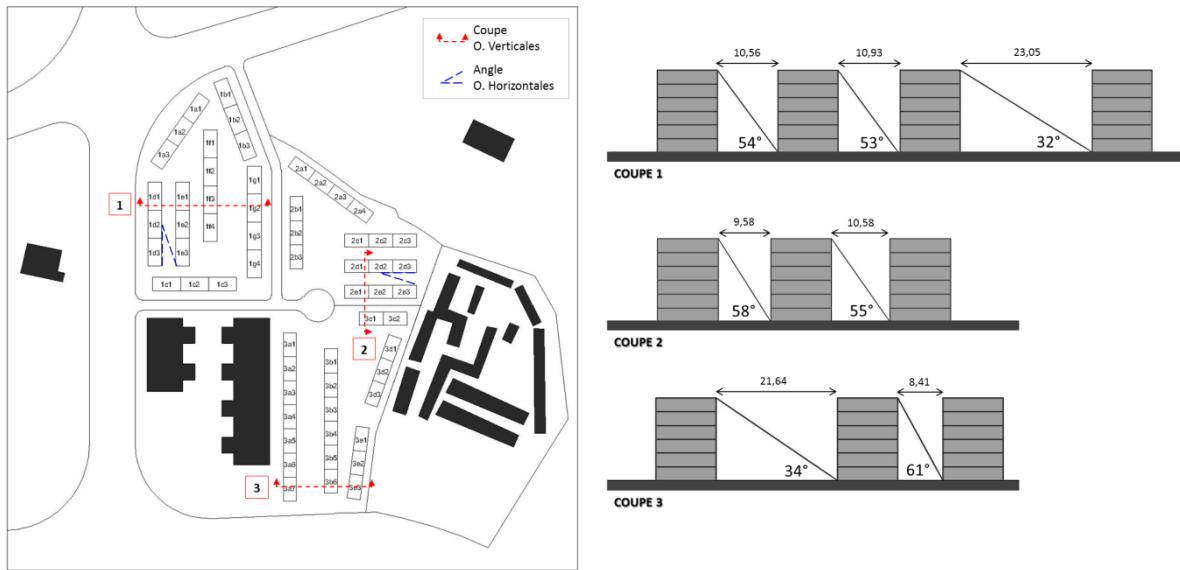


Figure 98 Cas 1 : Obstructions horizontales (Plan) – Obstructions verticales (Elévation)

**Le cas 2** réorganise les bâtiments en diminuant le COS à la moitié. Pour atteindre cela nous avons dupliqué la hauteur des édifices obtenant 12 étages. Après nous avons disposé les rangées à des distances de 28.8 m, ce qui nous donne un angle d'obstruction verticale de 45°. Cela veut dire que la distance entre bâtiments est la même que leur hauteur.

Dans ce cas on peut identifier quelques bâtiments qui n'ont pas d'obstructions horizontales (1b1, 1b2, 2a1, 2b1, 3a5, 3a6, et 3a7). C'est à dire qu'ils vont recevoir plus d'éclairement énergétique provenant des côtés. On montre aussi les angles d'obstruction horizontale des rangées de lots 1 et 2, où la valeur varie de 24° à 38°.

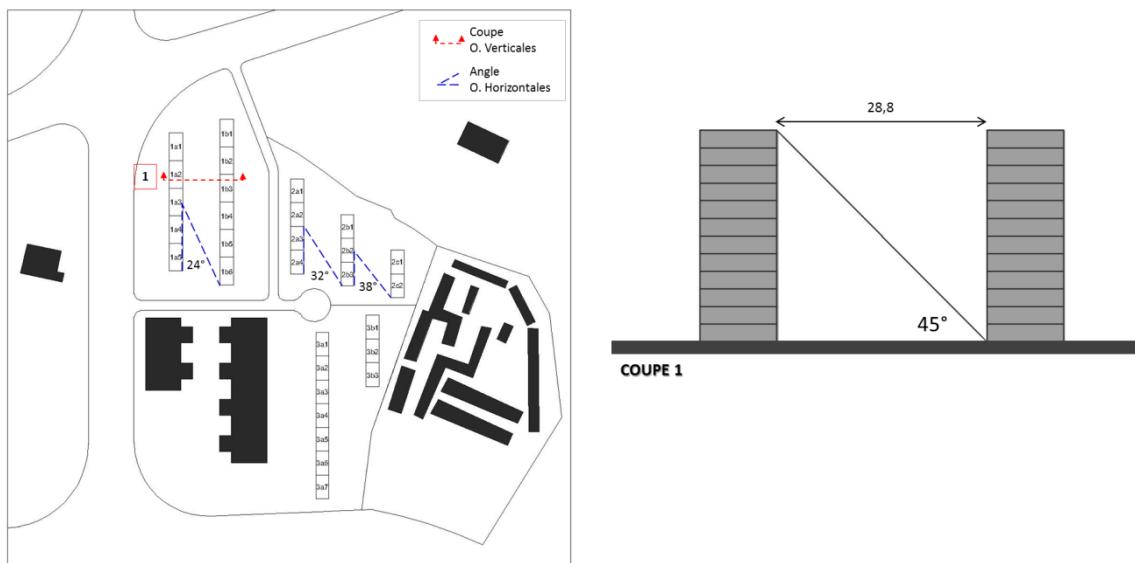
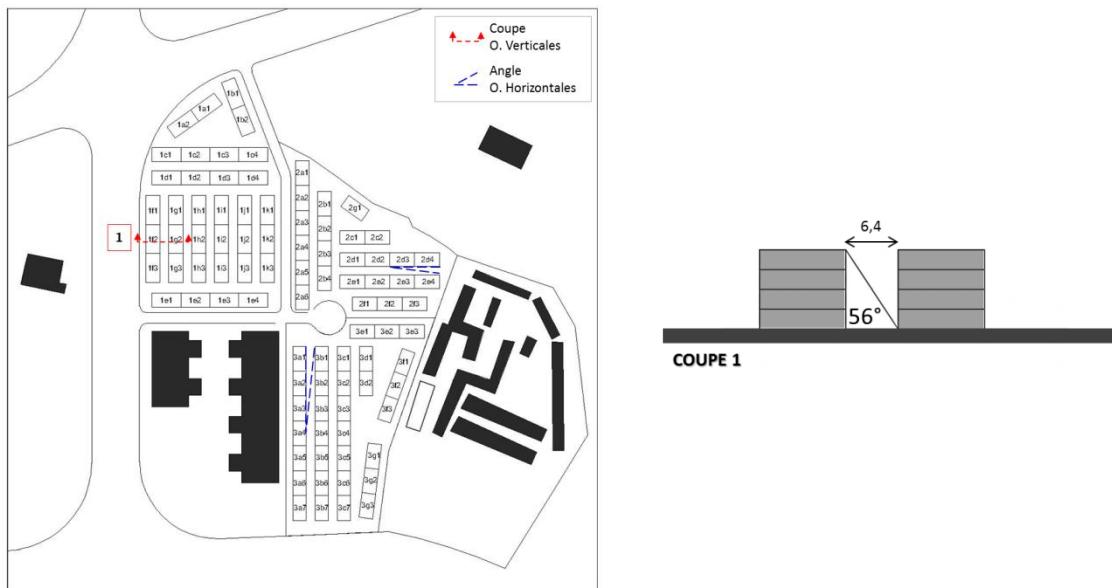


Figure 99 Cas2 : Obstructions horizontales (Plan) – Obstructions verticales (Elévation)

Finalement **le cas 3** réorganise les bâtiments en augmentant le COS de référence un 25%. Pour obtenir cela nous avons diminué la hauteur des bâtiments à seulement 4 étages. La distance entre bâtiments est toujours la même, 6.4m, et l'angle d'obstruction verticale est 56°.

Les angles d'obstruction horizontale sont très serrés, pour les rangées soulignées dans le lot 2 de 10°, et pour celles du lot de 3 6°.

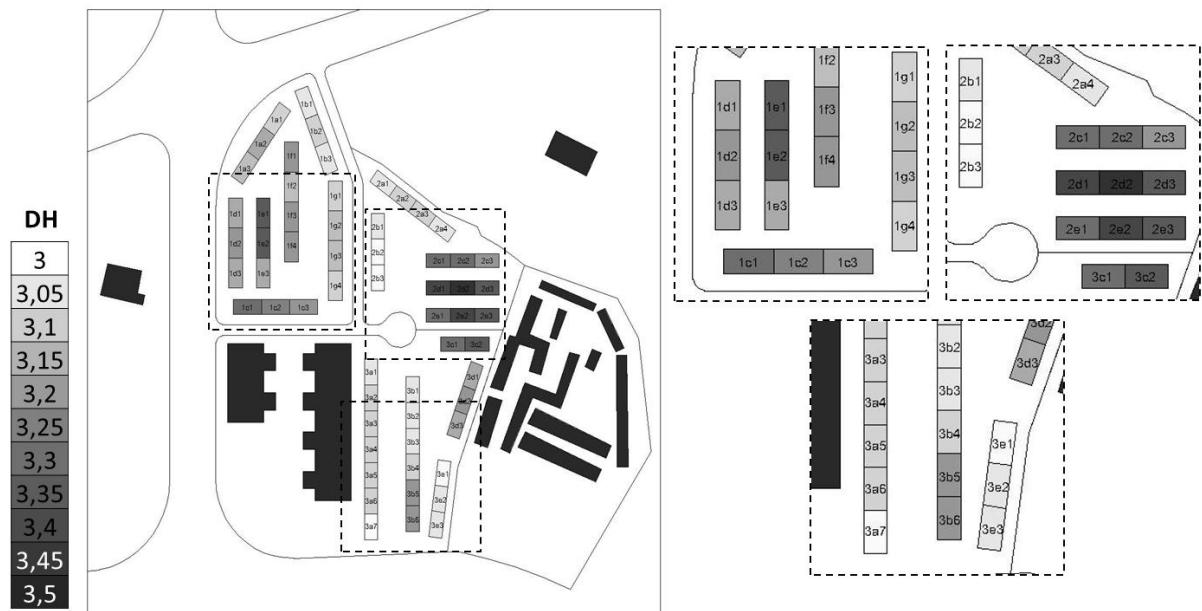


## 5.0 RESULTATS DE SIMULATIONS

Les premières simulations ont été faites sans tenir compte de l'effet des occupants, ainsi on évalue dans les figures suivantes seulement l'effet des formes urbaines, de la densité urbaine et des matériaux.

Pour chaque cas d'étude une échelle du blanc au noir a été définie afin de mieux illustrer l'inconfort thermique : Pour le premier cas, nous avons obtenu une échelle de 3DH à 3.5DH (Figure 101) ; pour le deuxième cas de 2.4DH à 2.7DH (Figure 103) ; et pour le dernier cas de 3.95DH à 4.15DH (Figure 104)

### 5.1. CAS D'ETUDE 1 – COS 0.30



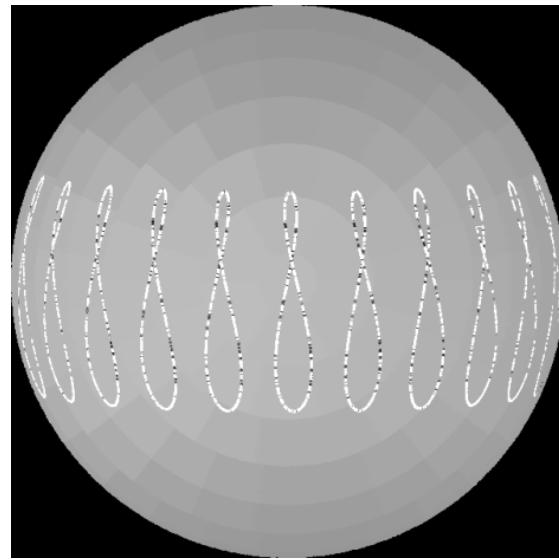


Figure 102 Ciel Cumulé pour Bogotá en vue hémisphérique – Image réalisée avec le logiciel RADIANCE

## 5.2. CAS D'ETUDE 2 – COS 0.15

Pour bénéficier de l'orientation des bâtiments privilégiée nord-sud, le deuxième cas présente tous les bâtiments avec la même orientation. Dans ce second cas les bâtiments sont plus élevés permettant plus d'espace entre les rangées, ce qui conduit à moins d'obstructions verticales et horizontales par rapport au premier cas, et donc plus d'éclairement énergétique pour les façades est et ouest. Dans la Figure 103, l'effet de l'obstruction horizontale est visible dans les rangées 2a, 2b et 2c où la dégradation de DH est remarquée.

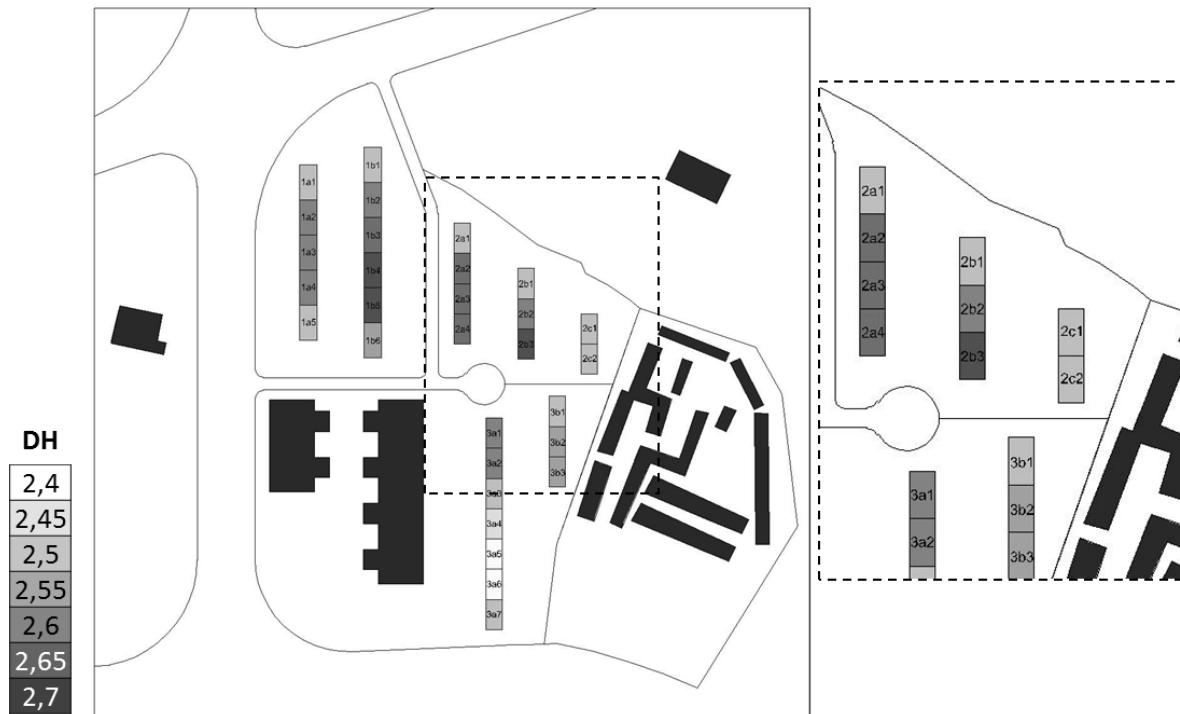


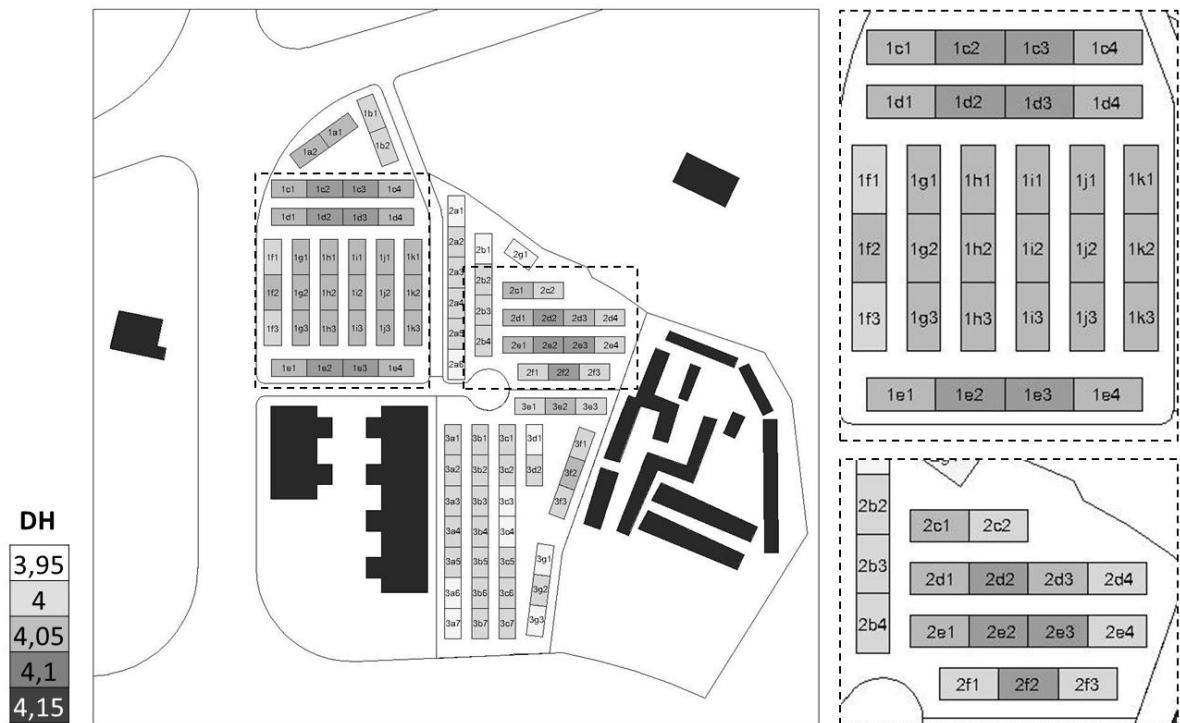
Figure 103 Résultats Cas 2 – sans occupants

### 5.3. CAS D'ETUDE 3 – COS 0.46

Pour le cas 3 une échelle de 3.95DH à 4.15DH a été définie, c'est à dire qu'il y a juste une différence de 0.20DH entre le meilleur et le pire comportement thermique du bâtiment. Cette légère variation de DH peut être expliquée par l'élevé coefficient d'occupation du sol, ce qui augmente les obstructions horizontaux et verticaux en affectant considérablement l'irradiation reçue par les façades. Par conséquent on obtient un comportement thermique relativement similaire dans tous les bâtiments.

En dépit de cela, dans la Figure 104 nous pouvons encore remarquer que les rangs 1c, 1d, 1e, 2c, 2d, 2e, 2f et 3e présentent des valeurs plus élevées de DH, ce qui peut s'expliquer par l'orientation est-ouest des bâtiments.

Le DH moyen du troisième cas est de 4.05, ce qui, selon les résultats, est surtout à cause du chauffage hypothétique. Ce fait suggère que le comportement thermique est la conséquence d'une réduction des gains solaires causés par des obstructions verticales et horizontales.



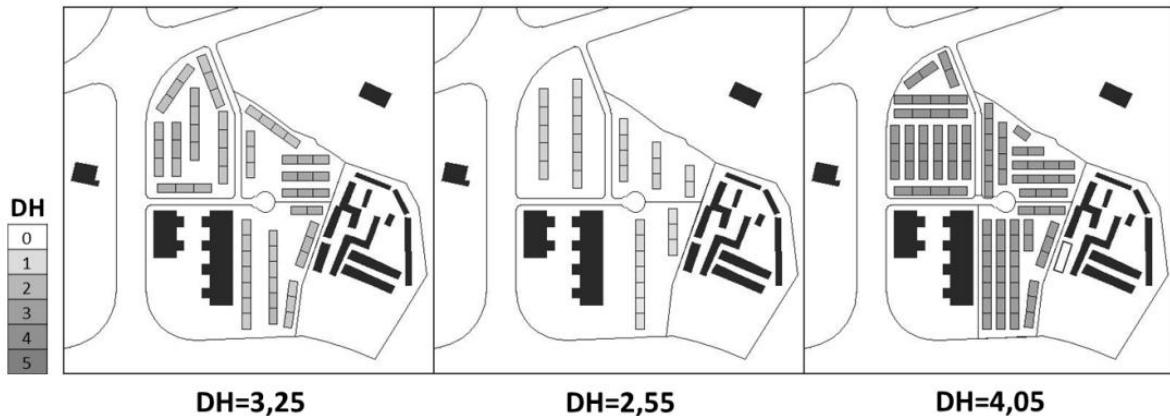


Figure 105 Comparaison 3 cas d'étude - Valeurs moyennes de DH Sans Occupation

## 5.5. COMPARAISON DE 3 CAS D'ETUDE - AVEC OCCUPATION

Les simulations considérant les apports internes des occupants, appareils et luminaires ont été faites avec le profil et les paramètres d'occupation définis dans la Figure 83.

Avec les simulations nous avons obtenu une échelle de 1.7DH à 2.6DH : La valeur de DH la plus basse a été obtenue dans le cas 2, bâtiment 3a7 avec un DH de 1.76, tandis que la valeur la plus haute a été trouvée dans le cas 3, bâtiment 1d2 avec un DH de 2.58.

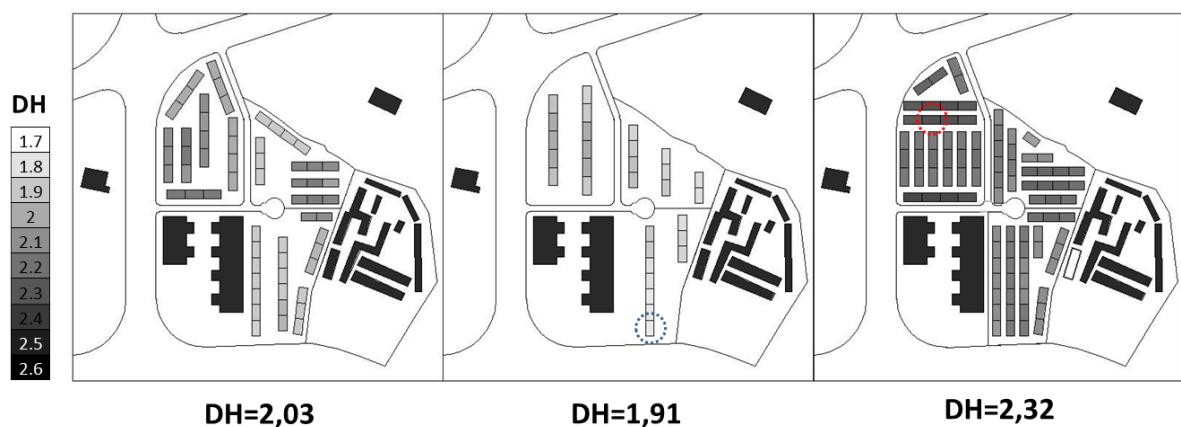


Figure 106 Comparaison 3 cas d'étude - Valeurs moyennes de DH Avec Occupants

Les gains internes produits par les occupants, les appareils et la lumière ont amélioré le confort thermique des bâtiments par rapport aux résultats obtenus sans l'occupation totale. Dans le premier cas nous remarquons une différence de 1.22DH, dans le deuxième cas de 0.64DH, et dans le troisième cas de 1.73DH.

Cela suppose qu'au fur et à mesure qu'augmente le coefficient d'occupation de sol, la quantité d'irradiation solaire reçue par les façades diminue (apports solaires) et par conséquence les apports internes deviennent plus importants et plus influents dans le comportement thermique dynamique à l'intérieur des bâtiments.

## 6.0 CONCLUSIONS

On a remarqué qu'il y a trois paramètres qui peuvent avoir une influence sur le comportement thermique des bâtiments : l'obstruction verticale, l'obstruction horizontale et l'orientation.

Les obstructions verticales et horizontales sont deux variables qui ont été étudiées dans [23] afin d'évaluer l'influence de la densité urbaine sur l'éclairage naturel en milieu urbain et le potentiel solaire. Dans cette étude nous avons évalué l'influence de la densité urbaine sur le comportement thermique des bâtiments, en concluant qu'il y a effectivement une influence des obstructions verticales, horizontales et aussi de l'orientation : L'obstruction horizontale est liée au COS (coefficients d'occupation de sol – vu en plan) et l'obstruction verticale est liée au CUS (coefficients d'utilisation de sol – vu en élévation). Par conséquent, nous avons remarqué qu'il est possible d'améliorer le confort thermique de l'ensemble urbain en maintenant la même densité humaine et le même coefficient d'utilisation de sol (CUS), avec un bas coefficient d'occupation de sol (COS) et des bâtiments plus hauts. De cette manière on peut diminuer les obstructions horizontales et verticales et les bâtiments reçoivent plus d'irradiation solaire.

En ce qui concerne l'orientation, dans tous les cas, nous avons vu une différence considérable entre les bâtiments orientés nord-sud et ceux orientés est-ouest, avec une préférence pour l'orientation nord-sud afin de profiter au maximum des gains solaires du climat de Bogotá.

D'autre côté l'occupation est une variable importante à tenir en compte pour l'analyse de confort car elle a une influence non négligeable sur le comportement thermique des bâtiments surtout dans le cas des logements social où la densité humaine est haute. L'influence des apports internes dépend des apports solaires reçus par les édifices.

### 6.1. RECOMMANDATIONS PRATIQUES

Selon les simulations, le comportement thermique des 3 cas d'étude est conséquence d'une réduction des gains solaires causés par l'orientation des bâtiments et par des obstructions verticales et horizontales. Alors, afin d'avoir une bonne dynamique de températures à l'intérieur des bâtiments appartenant à un quartier de logement social, il est important de dessiner l'ensemble urbain avec le but d'augmenter la quantité de rayonnement solaire reçue par les surfaces. Conformément nous émettons les recommandations suivantes :

- L'orientation préférable pour les bâtiments à Bogotá est nord-sud.
- Un bas COS est recommandable car il augmente la quantité d'irradiation solaire reçue par les bâtiments, comme on peut le voir clairement dans la Figure 107.
- Il est important de maintenir un angle d'obstruction verticale d'au moins de 45°, ça veut dire que la distance entre les bâtiments doit être équivalente à sa hauteur.
- Un bas COS ne veut pas dire une basse densité : il est possible de maintenir le CUS et de loger le même nombre de personnes en utilisant un bas coefficient d'occupation de sol.

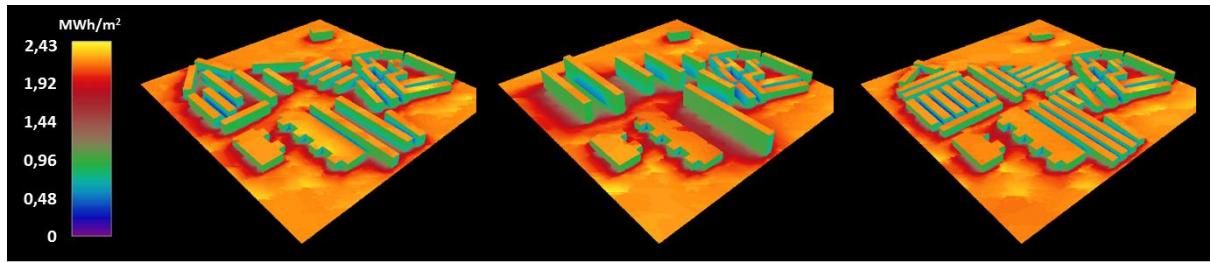


Figure 107 Comparaison 3 cas d'étude - Image de synthèse RADIANCE

## 6.2. PROCHAINES ÉTAPES

Comme on a étudié le volume complet des bâtiments sans tenir compte des divisions des étages, l'étude ne donne qu'une idée générale du comportement thermique des bâtiments. D'autres études peuvent analyser l'effet de la densité urbaine dans le comportement thermique de chaque étage des bâtiments, ce qui peut offrir des résultats plus précis concernant les différentes hauteurs et les obstructions verticales et horizontales.

## 7.0 REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier la CFBE (Commission Fédérale des Bourses pour Étudiants Étrangers de la Confédération Helvétique) qui m'a fourni la bourse pour faire cette recherche.

Également je veux remercier le Dr Jérôme Kämpf qui m'a bien guidée pendant tout le processus de recherche, souvent en repoussant ses priorités pour m'aider à avancer.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Ruano, M., *Eco-urbanismo entornos humanos sostenibles: 60 proyectos*. 1998, Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
2. Robinson, D., *Vers de quartiers durables*: Lausanne.
3. Reeves, P., *An Introduction to Social Housing*. 1996, London: Arnold. 273.
4. Ministerio de Vivienda, C.y.T., *Política de Vivienda en Colombia*, V.d. Vivienda, Editor. 2011.
5. DREAL. *Introduction a l'histoire du logement social en France notamment*. 2010 4 octobre [cited 2011 28 novembre ]; Available from: <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/introduction-a-l-histoire-du-a1102.html>.
6. Quiroga, C., *Vers des Quartiers Durables*. 2009, Université Catholique de Louvain - Ecole Polytechnique Federale de Lausanne - Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse.
7. Howard, E., *Garden Cities of To-Morrow*. 1985 ed. Vol. XXXIX. 1985, London: Eastborne, Attic Books.
8. Rambert, C., *L'habitat collectif, problème urbain*. Vol. I. 1955, Paris: Editions Vincent, Fréal et Cie. 142.
9. Ballén, S.A., *Vivienda social en altura, antecedentes y características de producción en Bogotá*. Revista INVI, 2008. **24**(67): p. 95-124.
10. Peralta, B.G., *Vivienda Social en México (1940-1999)*. Cuadernos de Vivienda y de Urbanismo, 2010. **3**(5): p. 34-49.
11. Alberto Saldarriaga Roa, R.L.B., *La ciudad de Dios en Bogotá. Barrio Villa Javier*. 1994, Bogotá: Fundación Social.
12. Ospina, F. and R. Bermúdez, *Vivienda Social*, in *Una mirada desde el hábitat y la arquitectura*. 2008, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.: Bogotá. p. 1 - 80.
13. Varela, A., *Kennedy y Tunal I: Modelos experimentales de vivienda*. Urbanismos: p. 138-142.
14. DANE, *Metodología Déficit de Vivienda*, D.A.N.d. Estadística, Editor. 2009: Bogotá. p. 56.
15. Ceballos, O.L., *Política Habitacional y Calidad de la Vivienda*. Bitacora, 2006. **10**: p. 148-157.
16. Amarilo. *Ciudad Verde*. Available from: <http://www.amarilo.com.co/ciudad-verde>.
17. Colombia, P.d.I.R.d., *DECRETO 4260 DE 2007*.
18. DANE, *Deficit Vivienda Censo 2005*.
19. Sanchez, A., *índices de Sustentabilidad en Proyectos de Vivienda de Interés Social - Caso Pereira*, in *Arquitectura y Urbanismo*. 2011, Universidad Nacional de Colombia: Manizales, Colombia. p. 1 - 300.
20. Scartezzini, J.-L., *Quartiers Urbains, Infrastructures et Aménagements Durables*, U.E. 03, Editor. 2012: Lausanne.
21. ARENE, *Quartiers Durables - Guide d'expériences européennes*. 2005, Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Énergies: Ile-de-France.

22. Tosolini, P., *Plan de quartier: éléments de projet*, U.E. 03, Editor. 2012: Lausanne.
23. Cheng, V., K. Steemers, and M. Montavon, *Urban Form, density and Solar Potential*, in *The 23rd Conference on passive and Low Energy Architecture, Geneva Switzerland*. 2006.
24. American Society for Heating, R.a.A.C.E., *ASHRAE Fundamentals Handbook*. 1989: New York.
25. Roulet, C.-A., ed. *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. 1 ed. 2004, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes: Lausanne
26. Johansson, E., *Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in fez, Morocco*. *Building and Environment*, 2005. **41**(10): p. 1326-1336.
27. Krüger, E.L., F.O. Minella, and F. Rasia, *Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil*. *Building and Environment*, 2010. **46**(3): p. 621-634.
28. Robinson, D., *CITYSIM: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning*, in *Eleventh International IBPSA Conference*. 2009: Glasgow, Scotland. p. 1083-1090.
29. Kämpf, J.H., *On the Modelling and Optimisation of Urban Energy Fluxes*, in *ENAC*. 2009, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne: Lausanne.
30. *LESOAI*. Available from: <http://www.lesosai.com/index.cfm>.
31. *MeteoNorm*.
32. *Constructora APIROS*. Available from: <http://www.apiros.com.co/>.
33. Fonseca, J.R., *Informe Final Asesoría Bioclimática Hotel Bacatá Express*. 2011: Bogotá D.C.
34. *GuardianSunGuard, Architectural Glass Catalogue*.
35. Givoni, B., *Man, climate and architecture*. 1967, London: Applied Science Publishers
36. Architecture, T., *Quelle Densité?* 2012: Lausanne.