HAL
open science

”Influence de la ventilation naturelle dans l’évolution de l’architecture tropicale”. ”Évaluation de cette influence au travers un regard d’architecte et d’urbaniste exerçant à La Réunion”

Antoine Perrau

To cite this version:

Antoine Perrau. ”Influence de la ventilation naturelle dans l’évolution de l’architecture tropicale”. ”Évaluation de cette influence au travers un regard d’architecte et d’urbaniste exerçant à La Réunion”. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de la Réunion, 2019. Français. NNT : 2019LARE0045 . tel-02951850

HAL Id: tel-02951850

https://theses.hal.science/tel-02951850

Submitted on 29 Sep 2020

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

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

Université de La Réunion

Thèse

Présentée pour obtenir le grade de :

Docteur de l'Université de La Réunion

Spécialité : Architecture – physique du bâtiment

Présentée par :

Antoine PERRAU

«Influence de la ventilation naturelle sur l'évolution de l'architecture tropicale»

«Evaluation de cette influence au travers un regard d'architecte et d'urbaniste exerçant à La Réunion»

Thèse dirigée par : François GARDE

Codirigée par : Richard HYDE

Préparée au sein du laboratoire PIMENT EA 4518

Soutenue publiquement le : 29 Octobre 2019

Devant un jury composé de :

Marjorie Musy :	Directrice de recherche, CEREMA Ouest, Nantes, rapporteur.
Emmanuel Dufrasnes :	Professeur ENSA Strasbourg, rapporteur.
François Garde :	Professeur, Laboratoire Piment, Université de La Réunion,.
Richard Hyde :	Honorary professeur University of Sydney.
Mathieu David :	Maître de Conférences HDR, Laboratoire Piment, Université de La Réunion.
Jacques Gandemer:	Ingénieur Conseil, membre invité

« Pour savoir où l'on va il faut il faut savoir d'où l'on vient… »
Vieux proverbe Africain

REMERCIEMENTS

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon directeur de thèse, François Garde Professeur à l'Université de La Réunion, pour toute son aide. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a fait germer en moi l'idée de me lancer dans ce travail et a su me prodiguer la rigueur scientifique qui me faisait parfois défaut.

Je remercie également Richard Hyde Professeur, co-directeur de thèse, pour ses avis et conseil éclairés, malgré mon Anglais parfois approximatif.

Alain Bastide, Professeur à l'Université de La Réunion et ex-directeur du laboratoire Piment a accepté un architecte au sein de son équipe, qu'il en soit remercié.

Je remercie également Jacques Gandemer Ingénieur Conseil qui m'a initié au vaste monde de la ventilation naturelle et sa meilleure prise en compte dans mes projets, par sa passion et son enthousiasme si communicatifs.

Bien sûr, Michel Reynaud architecte, mon premier associé qui depuis de nombreuses années a été mon partenaire et co-concepteur de nombreux projets, dont ceux présentés dans ce travail, ainsi que Cédric Delahaye architecte et associé plus récents sont associés à ce travail par leurs apports respectifs.

Francis Allard, professeur à l'Université de la Rochelle, Frédéric Bonneau, professeur à l'ENSA de Toulouse, Emmanuel Dufrasne, maître assistant à l'ENSA de Strasbourg, Marjorie Musy, Ingénieur de recherche Culture, m'ont fait l'honneur de faire partie de mon comité de thèse, ils ont pris le temps de m'écouter et de discuter avec moi. Leurs remarques m'ont permis d'envisager mon travail sous un autre angle. Pour tout cela je les remercie.

Il m'est impossible d'oublier tous ceux qui m'ont si gentiment transmis des documents indispensables à ma bibliographie : Martine Ahkoon, DAC OI, Bernard Leveneur, conservateur du musée Léon Dierx, la DAC Martinique Guadeloupe Guyane, Franck Lenotre, Bruno Stagno, architecte, et Jimena Ugarte, paysagiste, la bibliothèque nationale du Congrès des USA.

Anne Catherine et Bruno Levieux nous ont gentiment autorisés à appareiller leur maison, ils en sont remerciés.

L'aide de Simon Chauvat, Ingénieur QE, Aurore Blanlot, urbaniste, Clara Sautron Ingénieur QE, Maareva payet ingénieure doctorante, Loïk You Seen, Ingénieur QE, des étudiants de l'ESIROI, Clément Dijoux, Sarah Tierpied, Sandra Rakotomanga , des stagiaires de l'agence, Nora Dhabi, Paul Turpin, m'a été précieuse.

Mes derniers remerciements vont à ma femme, Joëlle, qui a tout fait pour m'aider, qui m'a soutenu et surtout toujours supporté dans tout ce que j'ai entrepris.

RESUME

Mots clés

Ventilation naturelle – architecture bioclimatique tropicale – architecture vernaculaire – confort thermique- architecture passive – aérodynamique – aéraulique – climatologie –droit à la ventilation naturelle- urbanisme éolien

Cette thèse propose une approche axée sur l'étude de l'influence de la ventilation naturelle dans l'évolution de l'architecture tropicale, d'hier, aujourd'hui et demain. Ce travail part des constats liés à la crise énergétique et ses conséquences, le réchauffement climatique et l'usage immodéré de la climatisation. Il se focalise sur le milieu tropical en pleine croissance démographique, économique et donc énergétique.

Dans un premier temps elle répond à la question : Un climat commun, tropical humide, a-t-il pu produire des typologies architecturales originales et communes, malgré une forte dispersion géographique et temporelle, à une époque où la physique des bâtiments n'avait pas cours. ? Dans un deuxième temps, nous avons tenté de caractériser le confort thermique et par quels dispositifs (architecturaux et techniques) il est obtenu pour une « case » traditionnelle Réunionnaise représentative. Dans un troisième temps, nous nous sommes demandés : Comment transposer ces concepts anciens dans des projets contemporains, en respectant quels principes, avec quels outils et pour obtenir quels résultats ? Ceci à partir d'une évaluation de deux études de cas, L'Ilet du Centre et le collège Bouéni, des outils utilisés, de leur contexte d'emploi et l'efficience de ces dispositifs. Enfin dans un dernier temps nous avons pris conscience de la nécessité d'un changement d'échelle. Nous avons, au travers une étude de cas, la ZAC Cœur de ville de La Possession, étudié comment proposer la transcription et assurer la pérennité de la chaine de ventilation naturelle, étudiée dans les trois premières parties, afin de rendre le concept de ville éolienne applicable, opposable, et donc reproductible.

Résultats :

En termes de résultats, l'étude de ces exemples a montré l'importance de la ventilation naturelle dans la zone tropicale, l'impact sur les formes bâties, les solutions permettant l'obtention du confort dans une case traditionnelle réunionnaise, mis en évidence le rôle du contexte lointain et proche, le risque de dysfonctionnement en cas de modification de celui-ci, l'intérêt de l'usage approprié de nouveaux outils de conception, dont l'ingénierie aéraulique et de les adapter au contexte géographique, climatique et programmatique. Nous avons alors proposé d'assurer la pérennité de ces dispositifs à l'échelle du bâtiment en passant à l'échelle urbaine.

Ce travail de thèse a permis notamment de faire des propositions sur une transposition règlementaire de ces règles dans le PLU. Pour cela, nous avons établis des règles de constructibilité, dans le projet Cœur de ville de La Possession préservant un potentiel de ventilation naturelle aux bâtiments dans la trame urbaine grâce à une approche en ingénierie aéraulique intégrée. La transposition règlementaire de ces règles dans le PLU a enfin permis de définir un **droit à la ventilation naturelle.** Ceci constitue un premier exemple appliqué **d'urbanisme éolien** réglementaire tout en mettant en évidence la nécessité d'effectuer un suivi opérationnel rigoureux pour en assurer le succès complet.

ABSTRACT

Keywords

Natural ventilation - tropical bioclimatic architecture - vernacular architecture - thermal comfort - passive architecture - aerodynamics - air conditioning - climatology - right to natural ventilation – eolian planning

This thesis proposes an approach based on the study of the influence of natural ventilation in the evolution of tropical architecture, past, present and future. This work starts from the observations related to the energy crisis and its consequences, global warming and the excessive use of air conditioning. It focuses on the tropical environment, which is experiencing rapid demographic, economic and therefore energy growth.

First, it answers the question: Could a common, humid tropical climate have produced original and common architectural typologies, despite a strong geographical and temporal dispersion, at a time when the physics of buildings was not in use? In a second step, we tried to characterize thermal comfort and by which devices (architectural and technical) it is obtained for a traditional representative Reunionese "hut". Thirdly, we asked ourselves: How can we transpose these old concepts into contemporary projects, respecting which principles, with which tools and to obtain which results? This is based on an evaluation of two case studies, L'Ilet du Centre and Collège Bouéni, the tools used, their context of use and the efficiency of these devices. Finally, we have recently become aware of the need for a change of scale. Through a case study, we studied the ZAC Cœur de ville de La Possession, how to propose the transcription and ensure the sustainability of the natural ventilation chain, studied in the first three parts, in order to make the concept of a wind city applicable, enforceable, and therefore reproducible.

Results :

In terms of results, the study of these examples showed the importance of natural ventilation in the tropical zone, the impact on built forms, the solutions allowing comfort to be obtained in a traditional Reunionese hut, the role of the distant and nearby context, the risk of dysfunction in the event of modification of it, the interest of the appropriate use of new design tools, including aerothermal engineering and their adaptation to the geographical, climatic and programming context. We then proposed to ensure the sustainability of these devices on a building scale by moving to an urban scale.

This thesis work made it possible in particular to make proposals for the regulatory transposition of these rules into the PLU. To this end, we have established constructability rules in the Cœur de ville project of La Possession, which preserves the potential for natural ventilation of buildings in the urban fabric through an integrated airflow engineering approach. The regulatory transposition of these rules into the PLU has finally made it possible to define a right to natural ventilation. This is a first applied example of regulatory wind energy planning while highlighting the need for rigorous operational monitoring to ensure its complete success.

TABLE DES MATIERES GENERALE

NOMENCLATURE		8
INTRODUCTION		11
1	Qu'est-ce que l'architecture tropicale ?	16
2	Les objectifs	31
3	Bibliographie	33
CHAPITRE 1 : Analyse comparative de l'architecture prémoderne, vernaculaire, coloniale en milieu tropical humide		35
1	Introduction	37
2	Revue de littérature	41
3	Méthodologie	47
4	Résultats et discussions – Analyse des données	57
5	Conclusion	74
6	Bibliographie	77
CHAPITRE 2 : Analyse et évaluation des performances thermique d'une maison traditionnelle à La Réunion		81
1	Introduction	83
2	Revue de littérature	84
3	Méthodologie	86
4	Résultats et discussions – Analyse des données	101
5	Conclusion	121
6	Bibliographie	122
CHAPITRE 3 : Comment transposer les principes de l'architecture traditionnelle dans des projets contemporains ?		123
1	Introduction	125
2	Revue de littérature	126
3	Méthodologie	130
4	Résultats	134
5	Conclusion	172
6	Bibliographie	173
CHAPITRE 4 : Nécessité d'un changement d'échelle, vers un urbanisme éolien.		177
1	Introduction	180
2	Urbanisme éolien - revue de littérature	183
3	Documents d'urbanisme intégrant la ventilation naturelle	191
4	Conclusion des exemples étudiés	199
5	Méthodologie	200
6	Contexte	205
6	Résultats et discussion	215
7	Conclusion	231
8	Bibliographie	235
CONCLUSION GENERALE		241
	Bibliographie	248
ANNEXES		251

NOMENCLATURE
Abréviations

Acronyme	Définition	Unité
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (organisme Français).	
AMO	Assistant Maitre d'Ouvrage.	
APS	Avant-Projet Sommaire, phase d'étude normalisée d'un projet de maîtrise d'œuvre bâtiment dans la loi MOP.	
AVA	Air Ventilation Assesment.	
AVP	Avant-Projet, phase d'étude architecturale normalisée.	
BRAB	Building Research Advisory Board	
CDI	Centre de Documentation et d'Information. Local rencontré dans les établissements secondaires du second degré (collèges et lycées).	
COS	Coefficient d'Occupation du Sol. C'est un indicateur de densité de construction. Il est calculé avec le ratio de la SHON sur la surface du terrain bâti considéré.	
CF	Degré Coupe-Feu d'un élément de construction. Unité temps. Il décrit la durée de résistance d'un élément de construction à un incendie.	
CFD	Computationnal Fluid Dynamics OU MFN Mécanique des Fluides Numériques	
CTA	Centrale de Traitement d'Air.	
DOM	Département d'Outre-Mer.	
ECODOM	« le label ECODOM, Il a été mis en place en 1997 dans les DOM dans le but avoué d'éviter la climatisation artificielle (via un climatiseur individuel) et les dérives énergétiques dans l'habitat, tout en apportant un confort thermique optimal » (*Label ECODOM - enviroBOITE*, 2012)	
ECOPLU	Plan Local d'Urbanisme Ecologique. « C'est-à-dire imaginer la ville de demain à travers ses aménagements, ses modes de déplacements, la gestion des ressources naturelles, son développement social, économique en garantissant des espaces de vie de qualité et durables pour chaque habitant » *(Michel Fontaine Maire de Saint Pierre).*	
ESQ	Esquisse phase d'étude initiale architecturale normalisée.	
FSR	Floor Surface Ratio, équivalent Anglo Saxon du COS.	
GPS	Global Positionning Système. Système de géolocalisation par satellite (USA).	
HQE TM	Haute Qualité Environnementale. Une démarche environnementale pour la conception de bâtiments.	
IAQ	Internal Air Quality (Qualité de l'Air Intérieur).	

ICOMOS	Conseil International des Monuments et des Sites, est une organisation non gouvernementale mondiale associée à l'UNESCO. Il a pour mission de promouvoir la conservation, la protection, l'utilisation et la mise en valeur des monuments, des ensembles bâtis et des sites.
IGN	Institut Géographique National.
IUT	Institut Universitaire de Technologie.
LETCHI	Low Energy in Tropical Climate for Housing Innovation. Groupement initié par l'ADEME, pour le partage des connaissances dans la conception du bâti tropical. Inde, Sri Lanka, Thaïlande, Viet Nam et La Réunion y participent par le biais d'experts.
LEU Réunion	Laboratoire d'Ecologie Urbaine de la Réunion. Société d'ingénierie en qualité environnementale des bâtiments. Co-gérants : Michel Reynaud et Antoine Perrau.
LES	Large Edding Simulation.
MAYENERGIE	MAYotte ENERGIE, charte éditée par l'ADEME pour Mayotte.
MOP	Loi régissant la Maîtrise d'Ouvrage Publique en France et en particulier les relations avec la maitrise d'œuvre.
OAP	Orientation d'aménagement et de Paysage, outil réglementaire utilisé dans les règlements de ZAC.
Observ'er	Observatoire des Energies Renouvelables.
OMS	Organisation Mondiale de la Santé.
PIMENT	Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'environnmeNt et le bâtimenT.
PACTE	Programme initié par l'ADEME (voir ci-dessus) : Programme d'Action pour la qualité de la Construction et la Transition Energétique.
PADD	Projet d'Aménagement et de Développement Durables.
PERENE	PERformance ENERgétique pour les bâtiments, référentiel conçu à La Réunion proposant des outils de conception. L'objectif de PERENE est de concevoir des bâtiments et logements qui soient confortables (en été comme en hiver) tout en étant le plus économe possible sur le plan énergétique.
PLU	Plan Local d'Urbanisme, document réglementant le droit à construire à l'échelle d'une commune.
POE	Post Occupation Evaluancy, méthode d'évaluation Post Occupationnelle.
RANS	Reynolds-Average, Navier-Stokes.
Référentiel DD	Référentiel Développement Durable

RTAA	Règlementation Thermique Aéraulique et Acoustique. Règles prescrites à la Réunion et en Guyane pour la construction de logements neufs.	
SAR	Schéma d'Aménagement Régional. Outil de planification urbaine à l'échelle de la région.	
SCoT	Schéma de Cohérence Territoriale. Outil de planification urbaine à l'échelle de micro régions.	
SHON	Surface Hors Œuvre Nette. Elle est égale à la somme des surfaces des planchers de chaque niveau moins tout ce qui n'est pas aménageable (sous-sols et combles non aménageables, toitures terrasses, balcons, loggias, surfaces non closes du rez-de-chaussée et garages).	m²
SRAS	Syndrome Respiratoire Aigu Sévère lié au coronavirus.	
SU	La Surface Utile est définie en France par le Code de la construction et de l'habitation, dans l'article R. 353-16[1]. Elle est égale « à la surface habitable du logement, telle qu'elle est définie à l'article R. 111-2, augmentée de la moitié de la surface des annexes définies par un arrêté du ministre chargé du logement ».	m²
TCO	Territoire de la Côte Ouest. Intercommunalité de l'Ouest de La Réunion.	
TPCAU	Théories et Pratiques de la Conception Architecturale et Urbaine.	
UNESCO	Organisation des Nations Unis pour l'Education, la Science et la Culture.	
ZAC	Zone d'Aménagement Concertée. Procédure d'urbanisme française utilisée pour aménager, en concertation avec les pouvoirs publics, de nouvelles zones ouvertes à l'urbanisation.	

INTRODUCTION

Evolution schématique d'une case créole réunionnaise - © Antoine Perrau

TABLE DES MATIERES

1 Qu'est-ce que l'architecture tropicale ?.....15
1.1 La zone tropicale (définition du périmètre de l'étude) et ses enjeux.....15
1.2 L'architecture tropicale 18
1.3 L'architecture passive ou bioclimatique 18
1.4 La conception aérothermique, une approche adaptée en milieu tropical humide. ...19
1.5 Les questions posées par ce travail ?.....29
2 Les objectifs 30
2.1 Chapitre 1 30
2.2 Chapitre 2 30
2.3 Chapitre 3 30
2.4 Chapitre 4 31
3 Bibliographie 32

Pourquoi cette thèse ?

Architecte en activité depuis 30 ans, maître de conférence associé à l'école d'architecture de Montpellier : ENSAM, antenne de la Réunion depuis 4 ans et impliqué dans la formation professionnelle depuis 5 ans, j'ai éprouvé le besoin de faire un point et un retour sur mes acquis, mes questionnements et prendre le temps d'approfondir un sujet qui me tient à cœur et qui me guide dans mon travail depuis des années: **la ventilation naturelle en milieu tropical et les relations de celle-ci sur l'architecture tropicale**. Il m'est assez rapidement apparu que ce contexte, différent de mon milieu métropolitain d'origine, devait influencer de manière déterminante l'architecture que je serai amené à produire. La prise de conscience des enjeux environnementaux m'a très rapidement convaincu de la nécessité de comprendre les principes de l'architecture passive bioclimatique spécifiques et m'a donc « naturellement » amené à essayer de mieux appréhender les mécanismes liés à la ventilation et à essayer de l'utiliser.

Pour cela, la connaissance de l'architecture pré moderne, vernaculaire et coloniale (d'avant l'utilisation des systèmes actifs) est certes indispensable et elle fera l'objet des chapitres 1 et 2 de cette thèse, mais pas suffisante. L'évolution des programmes de construction, des matériaux, des contraintes règlementaires, du contexte font que des solutions nouvelles, ou pour le moins une évolution des savoirs, doit pouvoir émerger et générer des architectures innovantes, c'est ce que nous essayerons de montrer dans le chapitre 3 par l'analyse d'études de cas de deux de nos projets.

Cependant, la spécificité du concept de ventilation naturelle fait que l'environnement proche et lointain d'un bâtiment influent nécessairement directement sur le comportement physique de celui-ci. Nous chercherons donc à montrer qu'au-delà de solutions architecturales nouvelles, il est indispensable de réfléchir et apporter des solutions au niveau de l'aménagement de la ville, pour proposer des outils de conception et de règlementation de la ville tropicale de demain, ce travail sera développé dans le chapitre 4.

Il apparait en effet nécessaire dans le contexte de la crise énergétique et climatique actuelle de travailler sur ces sujets. Pour mémoire, le secteur du bâtiment représente environ 20% des gaz à effet de serre (Dussud et al., 2015). Il n'est donc pas vain de réfléchir à ces aspects dans le contexte des tropiques.

Au-delà de ces questionnements précis, en tant qu'enseignant TPCAU à l'école d'architecture de La Réunion, c'est aussi l'occasion d'interroger mon positionnement sur la nature de la recherche en architecture et comment je l'ai décliné dans ce travail et qui de ce fait correspond à un positionnement épistémologique sur cette question. En effet il apparait clairement que cette discipline a des spécificités qui appellent des réponses qui lui sont propres. Ce travail, dans le cadre du laboratoire Piment, va donc tenter de proposer des passerelles entre la physique du bâtiment et l'architecture dans le champ de la recherche appliquée à cet objet.

« Notre maison brûle et nous regardons ailleurs » (Jacques Chirac à l'assemblée plénière du IVe Sommet de la Terre le 2 septembre 2002 à Johannesburg, en Afrique du Sud).

Cette citation est intéressante à plus d'un titre, en particulier elle révèle l'urgence de la problématique avec l'image de l'incendie et comme un fait exprès reprend la thématique de cette thèse : la maison. Ceci n'est d'ailleurs pas un hasard, le logis, le «home sweet home » est bien le lieu du confort, l'objet de toutes nos attentions et envies et justifie le sujet de cette recherche.

Nous ne pouvons ignorer le contexte actuel de crise énergétique et écologique et ses conséquences. Pour rappel, le bâtiment émet de manière directe 6,4% des gaz à effet de serre et 12,1% de manière indirecte,(Dussud et al., 2015) Il n'est donc pas inutile de se préoccuper de voir comment réduire ces émissions et en particulier celles directes, utilisées pour le rafraichissement en zone tropicale humide avec l'usage, souvent inconsidéré, de la climatisation (Figure 1). Celles-ci représentent par exemple 5% des consommations électrique du bâtiment dans les DOM (Départements d'Outre-Mer) Français, (Dussud et al., 2015).

Une des ruptures principales dans la réflexion architecturale tropicale se situe selon Chang (Chang, 2016) au milieu du 20ème siècle avec la très large généralisation de la climatisation. Cette arrivée des systèmes actifs a bien entendu eu un impact sur la consommation énergétique mais aussi sur les formes architecturales. On est passé alors, comme le souligne Kenneth Frampton, (Frampton, 2007a), d'une architecture basée sur une culture enracinée « rooted culture » à une architecture « représentative de la domination de la technique universelle ».

Il apparait donc intéressant de se poser la question de l'émergence d'une autre voie, respectueuse du contexte et ancrée dans notre époque et ses préoccupations nouvelles.

Figure 1 : Shanghai eau et clim à tous les étages (© La Tribune, crédit DR) ou les impacts des splits systèmes

1 Qu’est-ce que l’architecture tropicale ?

Notre zone d’étude a été volontairement circonscrite à la zone tropicale pour des raisons de cohérence de propos et d’unité géographique et afin de comparer des choses comparables dans un contexte défini. Il apparait donc nécessaire de bien la délimiter.

1.1 La zone tropicale (définition du périmètre de l’étude) et ses enjeux

1.1.1 Définition du climat tropical humide :

Il sera fait référence à la classification de Köppen – Geiger (voir Figure 2). Elle situe le climat tropical humide avec les repères Af et Am, la deuxième lettre caractérisant le régime pluviométrique, soit pour f des précipitations tous les mois de l’année et pour m un régime de mousson et Aw pour tropical à hiver sec (et le corollaire été humide).

C’est donc essentiellement dans ces trois zones Af, Am et Aw que se concentrera notre étude. C’est là que se pose le problème de confort en période chaude et humide (avec une période humide variable).

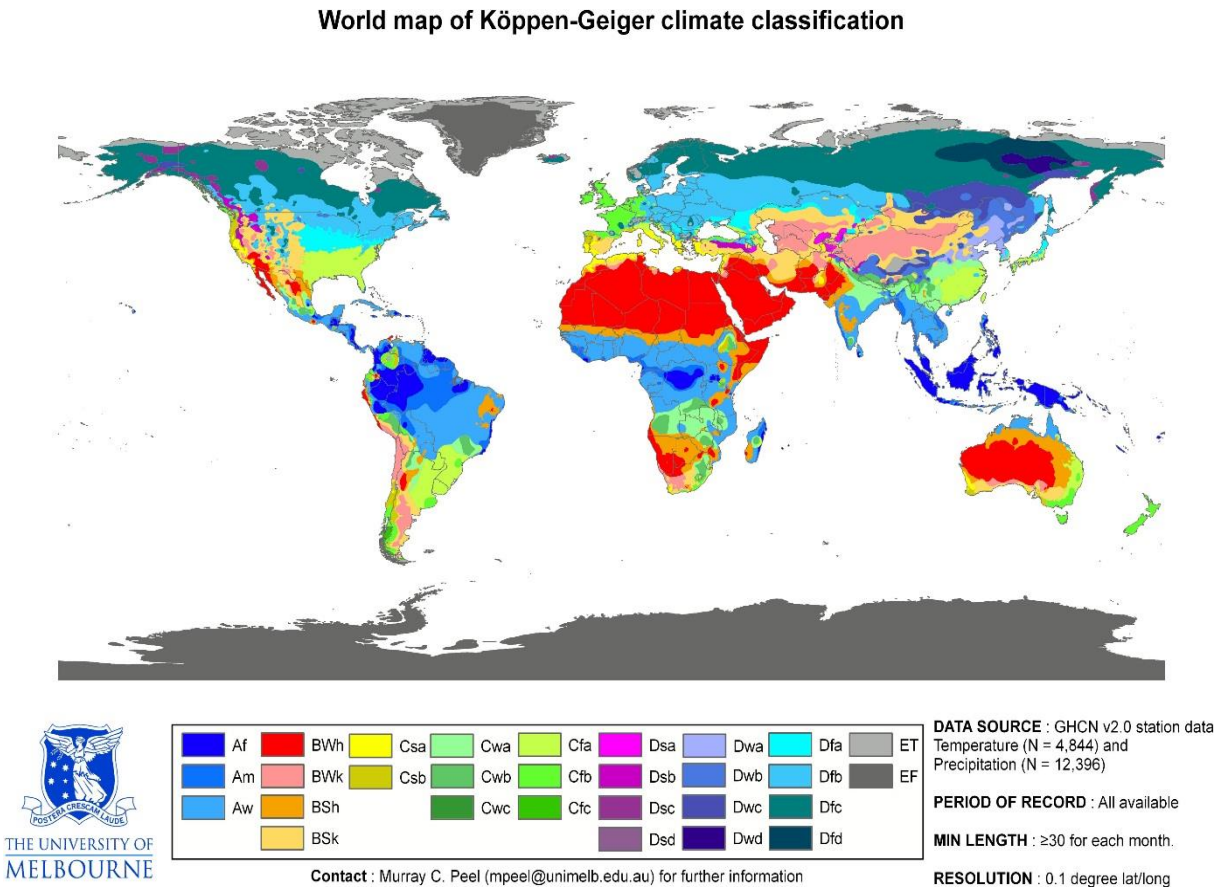


Figure 2 : Carte de classification des climats de Köppen-Geiger – Peel, M.C Finlayson, B.L., and Mc Mahon (© University of Melbourne)

Il est utile de rappeler ici les spécificités du climat tropical humide :

« Dans le système de classification des climats défini par Köppen, un climat tropical est un climat non aride où la température moyenne mensuelle ne descend pas en dessous de 18°C tout au long de l'année. Toutefois, la notion de transversalité des climats arides, unis en un groupe commun, est discutable, et il est tout à fait envisageable de considérer comme valide

la notion de climats arides tropicaux (tels que ceux qui concernent le sud du Sahara et de la péninsule Arabique, par exemple, ou encore une bonne partie du nord de l'Australie), lesquels se distinguent clairement des climats arides tempérés ou froids (désert de Gobi, etc.).

Selon Köppen, c'est donc la pluviosité qui définit avant tout les saisons. Il existe une saison sèche (faibles températures, précipitations quasiment nulles) et une saison humide (hautes températures, très fortes précipitations), la saison sèche ayant lieu autour du solstice d'hiver, lorsque les températures sont généralement plus fraîches, et la saison humide autour du solstice d'été, lors des mois les plus chauds. » ("Climat tropical — Wikipédia," 2017).

Une des variables fondamentales définissant le climat tropical humide est donc la pluviométrie et son corollaire l'hygrométrie qui en résulte. Cette hygrométrie joue un rôle fondamental dans les mécanismes liés à la transpiration et donc à la capacité de refroidissement du corps et ainsi au confort sous ces latitudes. Elle impacte aussi fortement sur le développement des moisissures et champignons, la qualité de l'air intérieur et la santé.

1.1.2 Les enjeux de la zone tropicale

« Les 140 pays tropicaux regroupent environ 34% des habitants de la Terre et ils ont une part beaucoup plus grande que les pays des latitudes moyennes et hautes dans l'accroissement actuel de la population mondiale. » (Hallé, 2010)

La notion de « tropicalité » a longtemps été ignorée par les économistes, historiens et géographes, (Hallé, 2010), pourtant le sentiment de familiarité que l'on retrouve ou que l'on soit dans cette zone des « basses latitudes » est bien présent. Hallé y cite quelques invariants ; « la présence de cocotiers le long des côtes maritimes est l'une des marques de la ceinture tropicale tout entière, hors de laquelle ces arbres ne peuvent, au mieux que survivre ».

Au-delà de cet aspect de carte postale, J'ai pour ma part expérimenté ce sentiment récemment ; lors d'un voyage en Australie pour des conférences. J'ai eu le bonheur d'être hébergé chez une architecte, plutôt que dans un de ces hôtels dits internationaux, mais en fait plutôt impersonnels. En découvrant sa ferme, au milieu des champs de cannes, encadrée par des montagnes de verdure, au soleil couchant, avec toutes ces fragrances de terre humide, je me suis senti chez moi, à La Réunion et les propos de F. Hallé prennent de ce fait une résonnance bien réelle dans mon esprit et ne font que renforcer mon envie de développer ce travail sur l'architecture tropicale.

Cette géographie vécue est soulignée par Chang (Chang, 2016) : « les tropiques ne sont pas juste une géographie physique définie par la zone comprise entre les tropiques du Capricorne et du Cancer, ou caractérisées par des conditions climatiques chaudes, ils sont aussi une « géographie imaginaire » qui était définie dans le mode de l'orientalisme Saidien, construit comme une altérité de la civilisation Européenne.

Il apparait cependant nécessaire de définir le périmètre de cette étude un peu plus précisément et avec une notion fondamentale et initiatrice de cohérence climatique. Dès les années 1950 Atkinson l'affirmait dans ses notes de Juin 1954 (Chang, 2016):« Le rôle de la météorologie et de la climatologie dans le design des maisons et bâtiments tropicaux ».Comme on le sait, le climat des Tropiques n'est pas monolithique mais il distingue différentes variantes selon la classification de Köppen – Geigger.

Nous nous concentrerons donc essentiellement sur le climat tropical humide (référencé Af et Am selon la classification de Köppen) qui correspond entre autres au climat de l'île de La Réunion, point de référence de mon travail du fait qu'il constitue la zone d'étude privilégiée par la localisation de notre périmètre d'étude. Cependant nous ne nous interdirons pas des

incursions dans d'autres zones à des fins comparatives, tant au niveau méthodologique, qu'architecturale.

1.1.3 Le contexte climatique de La Réunion

Le constat de l'importance de la connaissance du climat, voire du micro climat du site considéré est fondamental. Il convient donc d'établir de manière claire la « signature climatique » du site qui se caractérise par les données de température, ensoleillement, hygrométrie, radiation solaire et vent. Ces données devront pouvoir être détaillées par saison. En effet, pour le sujet qui nous préoccupe, à savoir l'architecture passive en milieu tropical, il est assez clair que la problématique principale se situe en saison chaude et donc ce sont bien les données de la saison chaude, et non pas sur l'année qui vont nous concerner. On peut se reporter à des diagrammes saisonniers de Givoni typique du climat tropical de l'Ile de La Réunion, objet d'une partie de ce travail, pour constater ce fait (voir Figure 3 et Figure 4). On y observe clairement seulement quelques points en dehors de la zone de confort en saison chaude, alors que la saison fraiche en est quasiment totalement exempte. Il faut souligner qu'il s'agit ici de données météo issues des fichiers de Météo France, au niveau de la mer.

Ceci met en évidence la possibilité de rester, avec une conception adaptée avec une bonne ventilation naturelle, dans les conditions de confort toute l'année. D'où l'importance de la ventilation.

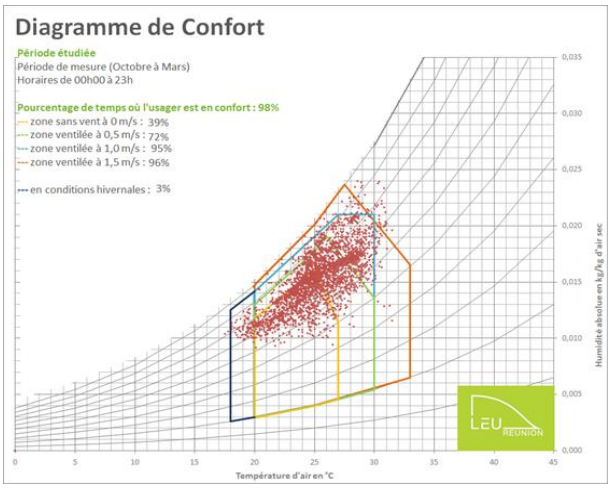


Figure 3 : Caractérisation du climat par diagramme de Givoni – île de La Réunion saison chaude, Octobre à Mars (© LEU Réunion – météo France)

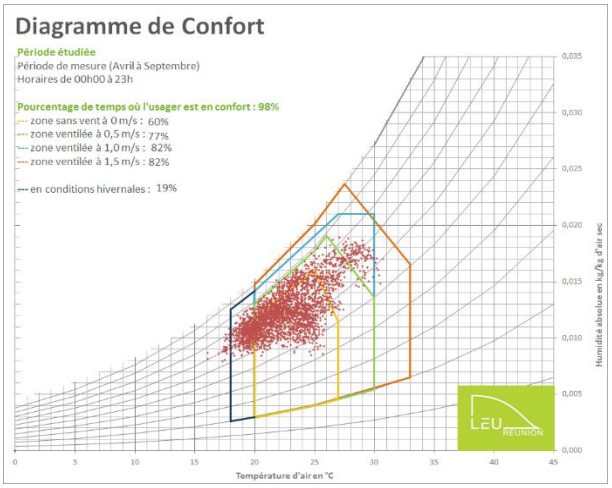


Figure 4 : Caractérisation du climat par diagramme de Givoni – île de La Réunion saison froid, Avril à Septembre (© LEU Réunion – Météo France)

1.2 L'architecture tropicale

Notre champ d'étude est donc l'architecture en milieu tropical. Ces deux mots nécessitent de préciser les dimensions qu'ils recouvrent. La question tropicale a été introduite ci-dessus, les dimensions liées à cette architecture restent à définir.

Ce point a été abordé par Kenneth Frampton dans son ouvrage (Frampton, 2007b) ou il décrit clairement l'influence des différents climats sur l'architecture et la voie d'un régionalisme critique (prenant en compte des réalités régionales, dont le climat) , par opposition au mouvement moderne international, ayant, comme son nom l'indique, vocation à être « universel ». C'est bien cet aspect régionalisme critique de l'architecture tropicale qui va nous intéresser dans ce travail et donc, en particulier, la période d'avant l'avènement du modernisme, recouvrant l'architecture vernaculaire, l'architecture coloniale et plus récemment le modernisme tropical (que l'on peut qualifier d'architecture bioclimatique) et son indissociable aspect de l'urbanisme tropical. En tout état de cause une approche opposée au style international et ses systèmes énergivores dépassés. Cela nous amène à préciser une autre notion sous tendue par cette approche, l'architecture bioclimatique.

1.3 L'architecture passive ou bioclimatique

Le concept d'architecture passive (Santamouris, 2012) s'oppose à celui d'architecture active, c'est-à-dire une architecture utilisant des systèmes actifs, consommateurs d'énergie, dans la gestion du confort, des ambiances et autres appareils forcément énergivores. C'est bien l'absence de système électromécaniques qui définit cette architecture frugale et qui est particulièrement intéressante dans notre contexte de crise énergétique. Il convient de souligner que la notion de passivité s'applique au bâtiment lui-même mais sous-entend des utilisateurs actifs et acteurs de leur confort pour suppléer à l'absence de système. L'exemple simple serait le fait de se lever et d'aller ouvrir la fenêtre si l'on a trop chaud…. On est aux antipodes de la domotique et du contrôle par télécommande (d'ailleurs initialement mise au point pour les personnes à mobilité réduite) et autres capteurs amenés inexorablement à tomber en panne (obsolescence programmée). Tous ces équipements génèrent des couts de maintenance importants, ou pour le moins consomment de l'énergie.

Ken Yeang, dans (Bay and Ong, 2006) définit la notion d'architecture passive comme une des 5 possibilités de concevoir un projet environnemental :

- Le mode passif (ou « bioclimatic design », sans utilisation de systèmes électro mécaniques) ;
- Le mode mixte (utilise de manière mixte le mode passif et des systèmes électro mécaniques ;
- Le mode total (utilise des systèmes électromécaniques avec des sources d'énergie externes souvent fossiles) ;
- Le mode productif (mode ou le bâtiment produit sa propre énergie) ;
- Le mode composite (mode qui reprend tous les modes précédents et qui varie en fonction des saisons).

Pour lui la stratégie de conception de forme bâtie doit commencer par le mode passif. Il nécessite une compréhension des conditions climatiques locales. Cette définition parait appropriée, elle ne se pose pas comme LA solution mais comme une des solutions d'un panel plus large ou l'optimisation énergétique reste une préoccupation constante.

Cette philosophie, n'en était bien sûr pas une avant l'apparition des systèmes actifs, elle était tout simplement une nécessité pour que les bâtiments conçus soient viables.

En tout état de cause, c'est bien cette stratégie passive qui est sous tendue par notre travail de thèse et nous essayerons de nous en inspirer, de les transposer, d'en « re » trouver les clés pour les adapter à de nouveaux programmes et de nouvelles échelles. Il n'est pas inintéressant de rappeler un autre intérêt de ce concept, il fonctionne toujours en mode dégradé c'est-à-dire en cas de crise (coupure de courant liée à une catastrophe naturelle ou un blackout du réseau comme cela est déjà arrivé par le passé). Dans ces cas extrêmes, le bâtiment reste confortable et les usagers peuvent continuer à vaquer à leurs occupations, ce qui n'est pas le cas d'un bâtiment climatisé qui va devenir rapidement inexploitable.

1.4 La conception aérothermique, une approche adaptée en milieu tropical humide.

Au-delà de la dimension architecturale, les aspects physiques qui y sont liés sont aussi fondamentaux. Il est important ici de mieux définir notre champ d'étude et les notions qui y sont liées. Nous nous attacherons à la conception aérothermique et donc à la conception thermique **et** aéraulique (la ventilation naturelle) des bâtiments et des effets attendus.

1.4.1 Le confort thermique

Il peut paraitre trivial de rappeler ici que l'on construit pour des usagers et pour qu'ils soient en situation de confort *(bien être, aisance, qu'apportent un vêtement, une pièce de mobilier, un véhicule, etc… définition dictionnaire Larousse)*, mais cette notion semble avoir trop souvent été négligée au regard d'autres critères, esthétiques, économiques, de mode, pour ne pas le souligner. Une architecture est un lieu de vie et ne peut faire l'impasse sur le confort de ses occupants.

On peut à ce sujet évoquer un « oubli » récurrent dans certaines approches d'ingénierie, la notion de confort s'applique à la zone de vie, c'est-à-dire là où se déroulent les activités humaines et non à un point quelconque du local ou du bâtiment considéré. Ce genre d'omission peut, par exemple, amener à considérer qu'un local en ventilation naturelle assurerait le confort si on pouvait justifier d'une vitesse d'air de 1m/s en un point quelconque du local. Ce flux ne sera pourtant efficace que s'il balaie le corps et/ou la zone de vie et non le plafond (voir définition du confort, Figure 5). En effet, c'est ce balayage sur le corps qui augmente le coefficient d'échange entre la peau et l'air environnant, développant ainsi une perte calorique de l'intérieur vers l'extérieur. (à la condition que la température de l'air soit inférieure à la température de peau qui est de l'ordre de 33°). La nature turbulente de cet écoulement optimise ces échanges par apport à un écoulement régulier comme le montre Faggianelli. (Faggianelli, 2014).

La notion de confort thermique est rappelée, entre autre, par Alain Liébard (Liébard and Herde, 2005), sur la base des travaux antérieurs menés par : Givoni ; Olgyay, Koenigsberger…,

Il considère un certain nombre de paramètres (voir figure 2). Nous ne prendrons ici que ceux liés directement au bâtiment et à son environnement et non aux occupants (habillement, métabolisme).

Les paramètres déterminants dans le bâtiment ou le local considéré seront donc : la température de l'air mesurée, la vitesse de l'air, la température de rayonnement des parois et le degré d'hygrométrie.

Figure 5 : Les paramètres du confort thermique du corps humain, Liébard et Herde 2005

Les deux clés fondamentales de cette température ressentie et de la régulation du bien-être, sont la température d'air et la température de surface des parois.

Notre étude s'intéressera bien sûr au paramètre vitesse de l'air et en particulier la vitesse présente dans un bâtiment ou un local dans la zone de vie et donc au potentiel généré ou non par une forme architecturale ancienne ou contemporaine.

Pour le caractériser nous utiliserons le diagramme de Givoni en considérant les travaux d'Aurélie Lenoir (Lenoir, 2105) en zone tropicale, dans le prolongement de ceux d'Olgyay (Olgyay et al., 2015), étendant la zone de confort à des hygrométries plus fortes dans la zone de vent de 1m/s prenant en compte l'adaptation des organismes au milieu tropical. On retrouve cette notion de confort en ventilation naturelle dans (de Dear and Brager, 1998). Il y est rapporté : « *Occupants in naturally ventilated buildings were tolerant of a significantly wider range of temperatures, explained by a combination of both behavioral adjustment and psychological adaptation* » « *les occupants d'un bâtiment en ventilation naturelle étaient tolérants à une plus grande variation de température, expliqué par des ajustements à la fois comportementaux et psychologiques* ».

La représentation de ce confort thermique par des diagrammes de Givoni nous parait adaptée. Elle est aujourd'hui largement répandue et admise dans la littérature (Givoni, 1992), (Szokolay, 1986) pour caractériser le confort dans un bâtiment. Nous l'utiliserons dans le cadre de cette

thèse car elle est couramment utilisée par les acteurs impliqués dans la construction bioclimatique.

Il est fondamental par ailleurs de souligner que les clés du confort thermique en milieu tropical ne se trouvent pas dans la seule résolution de l'équation de la ventilation naturelle. Il faut rappeler que l'élargissement de la zone de confort donnée par Givoni suppose que dans cette dynamique d'échange liée à la ventilation naturelle le débit considéré évacue également les charges thermiques.

Comme le souligne Dominique Gauzin Muller dans son ouvrage Architecture bio climatique (Gauzin-Müller, 2001), on ne peut oublier la dimension holistique de l'architecture.

C'est bien la prise en compte globale de ces facteurs liés au confort thermique qui permet d'atteindre des objectifs de conforts acceptables avec une dépense énergétique optimisée, ce qui doit rester une des cibles de tout concepteur.

1.4.2 La ventilation naturelle

La vitesse de l'air sur le corps et donc la ventilation naturelle dans un local est un paramètre fondamental du confort, nous allons ici préciser cette dimension.

En effet, trop souvent dans la littérature architecturale on s'arrête à cette simple appellation de ventilation naturelle, or elle recouvre pourtant trois concepts (voir Figure 6) et réalités bien différents (Fabien Picgirard - Jacques Gandemer 2012), qui trop souvent font l'objet d'amalgame ou pour le moins d'imprécision.

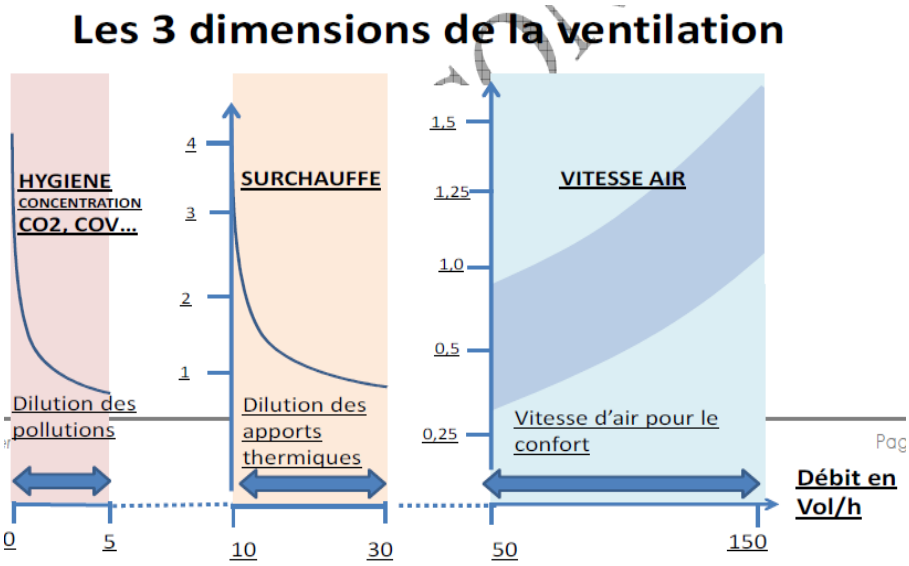
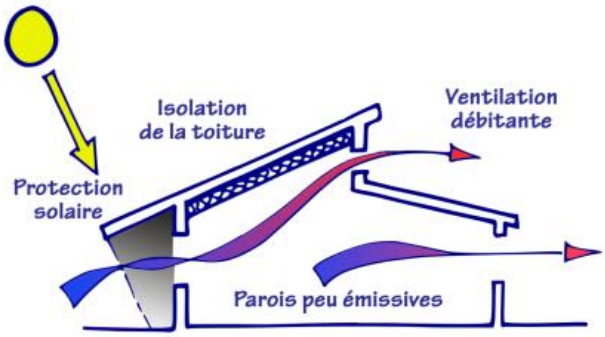


Figure 6 : La ventilation naturelle en pratique, les trois dimensions – © F. Picgirard, J. Gandemer, 2012



- ✓ Protection solaire performante
- ✓ Contrôle des charges thermiques internes
- ✓ Ventilation débitante, gérée et organisée
- ✓ Intégration des contraintes environnementales

Figure 7 : La conception aérothermique illustrée © J Gandemer - ADEME

Par ailleurs, la conception en ventilation naturelle est indissociable de la conception thermique (F Picgirard - J Gandemer, 2012), c'est ce concept de design aérothermique (voir Figure 7) qui nous intéressera tout au long de ce travail.

1.4.2.1 La ventilation naturelle de renouvellement d'air hygiénique

Elle se rattache à une notion hygiéniste de l'architecture et en particulier à la qualité de l'air. Elle est issue du respect des règles sanitaires. Il s'agit de respecter un débit de renouvellement d'air dans les pièces humides (sanitaires, salles de bain).

Ce débit permet aussi d'assurer une bonne qualité de l'air respiré en permettant l'évacuation des charges polluantes.

Il est d'ailleurs intéressant de souligner que l'air extérieur sera très souvent moins pollué que l'air intérieur et donc que la ventilation naturelle permet d'améliorer sensiblement la qualité de l'air intérieur des logements (Déoux and Déoux 2004). En effet l'air intérieur est issu de l'extérieur et chargé des polluants internes en sus.

L'ordre de grandeur de cette ventilation est de 1,5 à 5 vol/heure. (Vol. = volume d'air de la pièce).

1.4.2.2 La ventilation naturelle d'évacuation de surcharge thermique

Cette notion prend en compte un des phénomènes pouvant générer à terme de l'inconfort dans un bâtiment : les apports thermiques ou charges internes et externes. Ces apports sont générés par des sources distinctes : les systèmes, l'occupation humaine des locaux (de 70 à 180 KWh selon l'activité) et le rayonnement direct ou diffus sur l'enveloppe.

On comprend aisément qu'un bâtiment ou un local en condition de confort à un instant t, puisse, du simple fait de l'accumulation de ces apports, devenir inconfortable si on ne prend soin de les évacuer.

La ventilation naturelle d'évacuation de surcharge thermique s'attachera donc à assurer un renouvellement d'air permettant de maintenir les conditions initiales de confort au cours de l'utilisation du bâtiment ou du local considéré, ou pour le moins de ne pas les dégrader. Elle doit donc permettre qu'à tout moment la température intérieure reste inférieure ou égale à la température extérieure.

En conception en ventilation naturelle, cela conduit inexorablement à tendre vers un équilibre des températures intérieures et extérieures, du fait de la forte porosité du bâtiment et de l'ouverture des fenêtres.

Cette ventilation ne permet pas par ailleurs d'accumulation hygrométrique locale et génère donc aussi de ce fait un équilibre entre hygrométrie extérieure et hygrométrie intérieure. Cette dimension est en effet intimement liée à la ventilation.

Il est important de souligner que cette notion ne peut guère garantir le confort au-delà de 28°C de température mesurée car elle ne peut assurer des vitesses d'air suffisantes fournissant un supplément de confort par l'augmentation des échanges à la surface du corps. Elle constitue un objectif nécessaire et minimal à atteindre, mais devra être assistée de systèmes actifs, type brasseurs d'air, pour assurer le confort par convection forcée sur le corps.

L'ordre de grandeur de cette ventilation est de 15 à 30 vol/heure.

1.4.2.3 La ventilation naturelle de confort

Cette notion prend en compte la notion de vitesse de l'air définie dans le confort thermique. Cette vitesse de l'air est issue des phénomènes de pression et dépression du vent exercées sur un bâtiment et des circulations induites. En effet, le vent frappant un bâtiment développe un champ de pression instationnaire moyenne sur les façades et en toiture. La relation, par l'intérieur du local ou bâtiment considéré, de ces différences de pression va induire un courant d'équilibrage de compensation vers les manques relatifs. Ce courant va donc s'établir entre une façade en pression et une façade en dépression, mais aussi entre une façade en faible dépression et une façade en plus forte dépression. Il sera lui aussi « de nature turbulente, instationnaire et instable ». (J. Gandemer – CSTB)

Les schémas et équations de Bernoulli ci-après rappellent la source de ces circulations induites : l'équilibrage aérodynamique. On est bien là au cœur de la problématique de la ventilation naturelle de confort, à savoir, comprendre et utiliser au mieux ces courants d'équilibrage pour assurer une vitesse d'air utile et débitante dans un bâtiment.

La Figure 8 illustre :

L'équation de Bernouilli ou dans un fluide, une accélération se produit simultanément avec la diminution de la pression.

- P est la pression en un point (en Pa ou N/m²) ;
- ρ est la masse volumique en un point (en Kg/m3) ;
- v est la vitesse du fluide en un point (en m/s) ;
- g est l'accélération de la pesanteur (en N/Kg ou M/s²) ;
- z est l'altitude du point considéré (en m).

Il est important de rappeler ici la notion fluctuante et instable de la source vent, moteur de nos courants d'équilibrage. Ce constat nous amène à prendre les ordres de grandeurs et les mesures de vent avec prudence. On parle bien de direction et de vitesses moyennes avec une période de 10 mn correspondant aux caractéristiques de fichiers source : les fichiers météo. On reparle ici encore de l'importance de la maitrise de ces sources essentielles, pour ce qui nous concerne.

En fonction de l'usage du bâtiment il est communément accepté. (Fabien Picgirard - Jacques Gandemer 2012) que des vitesses de 1m/s sont une limite maximale au-delà de laquelle un inconfort apparait, en particulier avec l'apparition du phénomène des « feuilles volantes » pour

des bureaux. On pourra cependant admettre, pour des logements, des vitesses dans une fourchette de variation de 0,5 à 1,5m/s moyen, ce qui élargit la plage de confort.

Il faut aussi noter qu'il a été observé que « c'est lorsque localement le vent atteint 2,5 m/s en pointe que les problèmes commencent » (Gandemer - CSTB) : mouvement de poussières, feuilles qui volent…

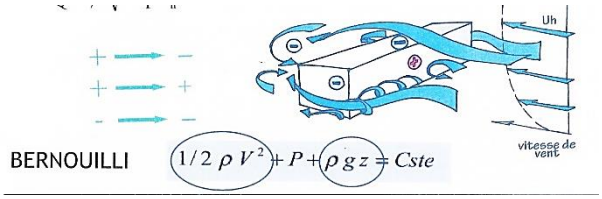


Figure 8 : La ventilation naturelle en pratique – © F. Picgirard, J. Gandemer, 2012

Cette nuance est loin d'être négligeable car de nombreuses études,(Tantasavasdi et al., 2001) se basent sur ce chiffre maximum de 1m/s, hors il est cependant clair que cette limite liée à l'inconfort de travail et aux phénomène des « feuilles qui volent » ne semble pas judicieuse pour des logements. On peut même se la poser pour des bureaux avec le développement du «tout numérique », en tout cas envisager de l'élargir en fonction des usages.

Par contre les conséquences du non élargissement des hypothèses de vitesse maximale admissible sont non négligeables. Elles peuvent limiter la plage d'usage de la ventilation naturelle et par là directement augmenter le nombre de jours d'inconfort théorique (selon les diagrammes de confort) et faire apparaitre la nécessité éventuelle de recours à la climatisation ou autre système actif pour rafraichir les locaux, avec les conséquences que l'on imagine au niveau énergétique. Il est toujours plus efficace de ne pas installer un système énergivore que de réguler son usage, on peut se baser ici sur la philosophie de l'association négawatt « Partant du principe que l'énergie la moins polluante est celle qu'on ne consomme/produit pas, négaWatt propose de repenser notre vision de l'énergie en s'appuyant sur une démarche en trois étapes qui rappelle que la meilleur façon de ne pas réduire sa consommation est de ne pas consommer… » ("La démarche négaWatt," 2016).

D'autres préoccupations sont liées à cette vitesse d'air, en particulier sa qualité. Cela nous ramène à un autre aspect lié à la ventilation naturelle, à savoir, le contrôle de la qualité de l'environnement extérieur et à une réflexion plus large sur la conception de la ville en ventilation naturelle que nous aborderons ultérieurement. Il s'agit bien en fait à partir de ce simple concept de ventilation d'explorer un nouveau modèle de ville et dans le contexte qui nous concerne de la ville tropicale de demain. Dans tous les cas cela confirme la dimension holistique de la conception bioclimatique et ne fait que souligner la différence avec l'architecture de système, centrée sur elle-même et s'isolant du contexte extérieur pour mieux s'en protéger, sans essayer d'agir ou inter agir avec celui-ci et l'architecture bioclimatique, ouverte sur son environnement.

Cette vitesse d'air doit par ailleurs avoir certaines « qualités » pour être pleinement efficace, à savoir éviter la notion de « jet » localisé mais aller plutôt vers une répartition homogène de la vitesse ce qui amène nécessairement à une réflexion sur la répartition de la perméabilité du bâtiment ou du local considéré. La notion qualitative de cette ventilation ne peut être sacrifiée sur l'hôtel du quantitatif, au risque d'être rendue inopérante et donc rejetée.

L'ordre de grandeur de cette ventilation est de 50 à 150 vol/heure

1.4.3 Les obstacles à la ventilation naturelle

Notre expérience d'architecte nous a souvent confronté au scepticisme et aux craintes liées à la ventilation naturelle. Celles-ci ont déjà été identifiées et répertoriées comme le rappelle Germano et Allard, (Germano, 2006),(Allard, 1998). On peut citer, pour mémoire le bruit, les insectes, les aérosols, la pollution et la nature même de cette ventilation qui génère des écoulements hétérogènes. Les négliger ou ne pas les traiter peut effectivement générer des dysfonctionnements liés à la fermeture des ouvertures, par exemple, pour régler ces problèmes.

1.4.3.1 L'imprécision des données

Il est utile de souligner ici l'importance fondamentale de la définition géographique de la zone d'étude et son corollaire, la bonne connaissance de celle-ci. En effet tout travail sur une architecture liée au climat, ne peut que s'appuyer sur une bonne analyse initiale de celui-ci. Ceci peut paraître évident, mais de nombreux exemples récents de projets architecturaux nous montrent malheureusement le contraire avec des bâtiments totalement inadaptés au contexte climatique et de ce fait devant utiliser beaucoup d'énergie pour les rendre confortables, ce qui n'est pas acceptable.

Ce point était déjà mis en évidence, comme le souligne Chang (Chang, 2016): "L'importance de la climatologie pour le design climatique est évident dans les notes d'Atkinson "Le rôle de la météorologie et de la climatologie dans les bâtiments et l'habitat tropical" écrit en Juin 1954.

Pourtant encore aujourd'hui, nous constatons quotidiennement dans notre travail l'imprécision de ces données, en particulier pour le vent. Par exemple dans un département tropical français comme La Réunion, seulement deux stations météo (Gillot et Pierrefonds) fournissent des données fiables au sens des normes internationales. Pourtant compte tenu de son relief montagneux, l'île présente de nombreuses disparités (effets de site et micro climats) sur ce point.

Il est urgent qu'un travail plus exhaustif et précis soit fait pour que les architectes et les ingénieurs travaillent avec des données fiables. Il apparait évident et d'ailleurs réglementaire, par exemple, qu'une étude de sol soit faite pour connaitre la nature du sous-sol du terrain d'assiette, mais pas encore de fournir des données climatiques fiables, tout en ayant une commande, pour un architecte, d'un bâtiment bioclimatique…La nécessité de positionner une station météo pendant une période représentative semble être un préalable nécessaire à une conception aérothermique fiable.

1.4.3.2 Le bruit

Nous faisons référence ici aux bruits extérieurs se propageant dans le local considéré. La nature ondulatoire du son fait que, comme beaucoup de nuisances, il est plus efficace et moins couteux de les réduire au plus près de la source si possible (voir Figure 9).

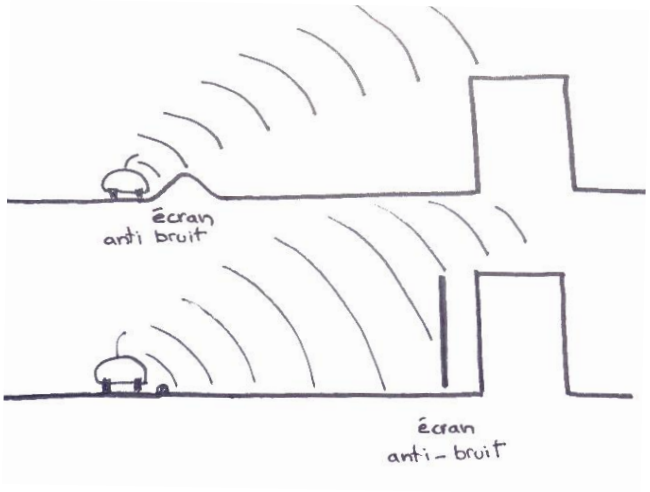


Figure 9 : Principe de diffusion d'une onde sonore – © auteur

C'est ce constat qui nous a amené à penser que les solutions efficaces pour les bâtiments passifs ne sont pas exclusivement à trouver dans la conception du bâtiment. En effet, bien souvent les nuisances sonores relevées (voir annexe 4) sont celles émises par les véhicules (Pathak et al., 2008) avec des effets très néfastes et en particulier les émergences, telles qu'une moto en pleine accélération. Des solutions sont donc à trouver au niveau de la conception de la ville, des véhicules. On n'évalue d'ailleurs pas encore l'impact, en termes de confort acoustique, de l'électrification en cours du parc auto. C'est ce constat qui nous a amené à réfléchir aussi à l'échelle du quartier et de la vile (voir chapitre 4). Des solutions existent aussi bien sûr, tout en préservant le potentiel de ventilation naturelle. L'utilisation des puits dépressionnaires (voir Figure 10), en est une illustration.

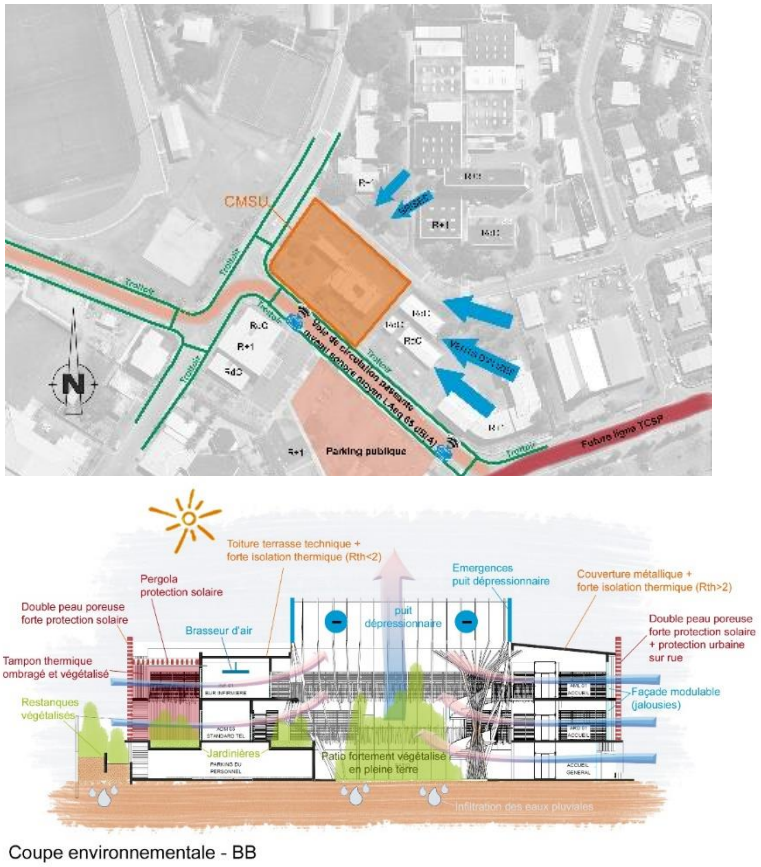


Figure 10 : Projet CAFAT – conception aéroclimatique avec interaction avec l'environnement – architecture de puit dépressionnaire – © antoine perrau architectures

1.4.3.3 Les insectes

Le milieu tropical est aussi le siège apprécié de nombreux insectes dont les mouches et les moustiques entrainant des désagréments voire des problèmes de santé (dengue, paludisme, chikungunya…). Là encore, la ventilation naturelle peut aggraver ces nuisances. Les solutions sont multiples, limitation des lieux de ponte des moustiques, débroussaillage en périphérie, pas d'eau stagnante ou pose de moustiquaire. Cette dernière solution « réduit l'efficacité de la porosité des façades d'environ 50% » (J. Gandemer - CSTB), il faudra donc corriger celle-ci en conséquence en cas d'usage de ce dispositif : augmentation de la porosité, optimisation de l'architecture…

1.4.3.4 Les aérosols

Ils sont directement transportés par le vent, en provenance des abords du bâtiment (poussières) ou de plus loin (pollution et autres). Il s'avère que la végétation en périphérie du bâtiment, en plus de participer à l'effet d'îlot de fraicheur recherché, a une grande capacité de stockage et de filtration de ceux-ci. Cependant, au-delà de certains seuils ou en fonction de leur nature (voir recommandations de l'OMS) ils peuvent représenter un danger pour la santé (Cesaroni et al., 2013). La seule solution pour assainir l'air est alors de le traiter, le filtrer, avant injection dans les bâtiments, mettant fin à toute possibilité d'utilisation de la ventilation naturelle. C'est malheureusement le cas dans certaines mégapoles surpeuplées et polluées (Inde (Badami, 2005), Chine, Mexique…).

A la lumière de ces précisions, on voit bien les disparités entre ces trois grandeurs de la ventilation naturelle et on imagine assez aisément leur impact sur la conception architecturale. En effet la dimension des ouvertures, la dimension des entrées d'air, la répartition des ouvrants, ou la porosité des parois seront nécessairement fondamentalement différentes et influenceront directement l'aspect extérieur des façades et du bâtiment, tout comme son fonctionnement intérieur.

De telles variations d'ordres de grandeur (de 1,5 Vol/h à 150 Vol/h) ont un impact sur l'expression architecturale des bâtiments et d'une certaine façon doivent caractériser l'architecture tropicale d'hier et d'aujourd'hui, objet de cette thèse. Cette idée a d'ailleurs été déjà évoquée par Kenneth Frampton (Frampton, 2007b): « la forme de la fenêtre définit la relation à l'environnement » *« The generic window is obviously the most delicate point at which these two natural forces impinge upon the outer membrane of the building, fenestration having an innate capacity to incribe architecture with the character of a region and hence to express the place in which the work is situated ».*

La fenêtre et son expression pourrait donc être un des marqueurs d'une architecture bio-climatique tropicale, nous tenterons de le montrer.

1.4.4 La chaine de la ventilation naturelle

Une des difficultés pour appréhender correctement la ventilation naturelle (voir Figure 11), au-delà de ses différentes dimensions, est de prendre en compte **la totalité** des paramètres la déterminant. Il sera vain d'essayer d'optimiser la dimension finale qui nous intéresse ici plus particulièrement, à savoir la vitesse d'air interne (m/s), ou son corollaire le débit interne ou taux de renouvellement d'air (Vol/h), source du confort de l'occupant, sans prendre en compte d'une manière ou d'une autre l'ensemble des paramètres ayant une influence directe sur celle-ci, à savoir :

La chaine de la ventilation naturelle :

- La climatologie régionale ;
- Le signal et ses caractéristiques,
- La topographie du site et son environnent immédiat ;
- Le site et l'urbanisme environnant le bâtiment ;
- La forme architecturale ;
- L'organisation du flux d'air dans la zone de vie.

Négliger un de ces paramètres remet fondamentalement en cause le succès de toute stratégie de ventilation naturelle, à contrario la bonne prise en compte de ceux-ci permettra de déterminer la potentialité de confort du site. C'est ce que nous essaierons de montrer dans ce travail au travers des différentes parties.

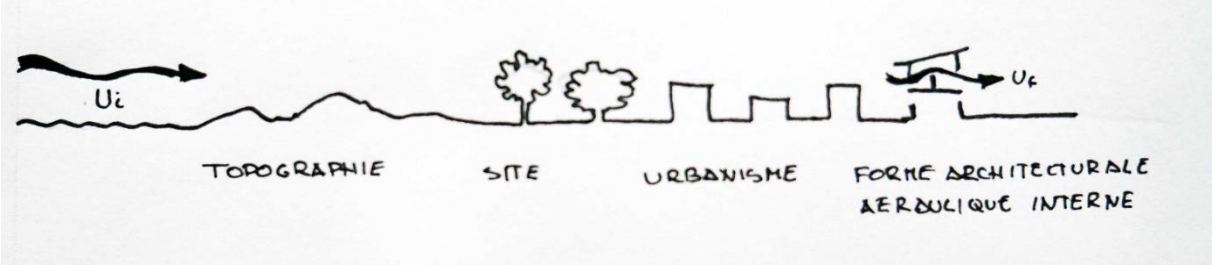


Figure 11 : La « chaine de la ventilation naturelle » illustrée – © auteur

Cette notion de l'importance de la ventilation naturelle dans le confort thermique a commencé à émerger en 1945. L'architecte Henri Pingusson résume la problématique climat –architecture comme suit : *« les conditions de séjour et de travail peuvent être grandement améliorées par un renouvellement constant de l'air ambiant, ce qui peut être obtenu soit par un conditionnement d'air très poussé (solution d'ingénieur), soit par une heureuse disposition des bâtiments sur le sol (solution d'urbaniste) ou la conception du logis (solution d'architecte) les deux dernières utilisant les vents légers régnant en permanence à la colonie »* Il définit une nouvelle appellation de ce travail : *« l'architecture éolienne »*("Architecture d'Aujourd'hui n°3," 1945) *.*

Par la suite cette approche s'est affinée. Ce n'est que dans les années 1960 que l'on commence à expliquer de manière scientifique le fonctionnement en ventilation naturelle. Il met en évidence l'origine de mouvements d'air crées par la différence de potentiel entre les zones de haute pression en avant du bâtiment et une zone de basse pression sur la façade opposée*. « La conclusion de l'ingénieur est identique à celle de l'homme de terrain mais elle est étayée par une modélisation qui relève de la mécanique des fluides »* (Guilloux Tristan, 1997).

1.5 Les questions posées par ce travail ?

Nous allons donc au travers de différents chapitres tenter de répondre aux questionnements suivants :

- Que peut-on apprendre des architectures prémodernes, vernaculaires ou coloniales ?
- Quel confort attendre de ces architectures par l'étude d'un exemple réunionnais ?
- Ces concepts sont-ils transposables dans l'architecture contemporaine, avec l'aide de quels outils et dans quel contexte ?
- Comment tenter de garantir la pérennité dans le temps des concepts architecturaux imaginés, malgré l'évolution du contexte bâti et au travers du changement d'échelle du bâtiment au quartier ou à la ville ?

2 Les objectifs

Au regard des constats et questionnements énoncés ci-dessus, à partir d'une bonne connaissance des concepts de l'architecture tropicale humide, il apparait intéressant de proposer des méthodes et des solutions conceptuelles actuelles adaptées à l'utilisation et l'optimisation de la ventilation de confort, tant dans les bâtiments contemporains que l'urbanisme tropical et de proposer cette alternative entre l'approche prémoderne, vernaculaire et coloniale et les solutions techniques universelles.

C'est ce travail de recherche appliquée qui sera développé dans cette thèse au travers d'un travail rétrospectif et d'études de cas issues de notre production architecturale et urbaine.

2.1 Chapitre 1

Nous allons donc dans un premier chapitre, à travers l'analyse d'un certain nombre de d'architectures conçues avant l'apparition des systèmes actifs, tenter de trouver des points communs et/ou des variations pouvant être liées au climat et à la recherche du confort en ventilation naturelle. Nous nous appuyons ici sur une analyse quantitative et comparative d'un certain nombre de paramètres architecturaux (constitution des parois, couleurs, forme et pente de la toiture, porosité, ouvertures et protections solaires, constitution des varangues). Nous allons aussi présenter le détail de quatre études de maisons, deux vernaculaires, deux coloniales et par type de climat tropical afin d'illustrer notre propos sur l'influence du climat sur certains paramètres architecturaux.

2.2 Chapitre 2

Dans un deuxième chapitre, par l'étude d'un exemple d'architecture représentative de l'architecture traditionnelle coloniale de l'île de La Réunion et répondant aux critères de choix du chapitre 1, nous évaluerons le confort de celle-ci et les paramètres tant extérieurs qu'intérieurs pouvant influer sur celui-ci. Nous utiliserons ici des outils de mesure physique (température, hygrométrie, rayonnement, ventilation) pour cette évaluation.

2.3 Chapitre 3

Dans un troisième chapitre, nous tirerons des enseignements de ces constats et verrons comment les transposer, avec quels outils et quels résultats, dans des projets contemporains en zone tropicale à La Réunion et à Mayotte. L'objectif restant toujours de respecter le postulat initial, obtenir le confort sans le recours à des systèmes actifs, comme c'était le cas des architectures d'avant la climatisation. Nous présenterons pour cela, deux approches différenciées, une plus intuitive (la règle du pouce et des recommandations générales) et l'autre plus récente et précise, la simulation en soufflerie et les STD (Simulations Thermiques, Dynamiques), leurs intérêts et contextes d'usages respectifs.

2.4 Chapitre 4

Dans un quatrième chapitre, à la lumière des contraintes liées au contexte de l'environnement du bâtiment, nous verrons comment et pourquoi, au travers une étude de cas d'un projet d'urbanisme, un changement d'échelle est nécessaire pour préserver le potentiel de ventilation naturelle d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments. Pour finir, nous tenterons de montrer comment ces contraintes peuvent être transcrites dans des documents d'urbanisme réglementaires pour qu'elles soient respectées et opposables afin de les rendre utilisables et pérennes.

3 Bibliographie

(Allard, 1998)	Allard, F., 1998. Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook. Earthscan.
("Architecture d'Aujourd'hui n°3," 1945)	Architecture d'Aujourd'hui n°3, 1945. pp.84-88.
(Badami, 2005)	Badami, M.G., 2005. Transport and Urban Air Pollution in India. Environmental Management 36, 195–204. https://doi.org/10.1007/s00267-004-0106-x
(Bay, 2001)	Bay, J.-H., 2001. Cognitive biases in design: the case of tropical architecture. Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde, Delft.
(Cesaroni et al., 2013)	Cesaroni, G., Badaloni, C., Gariazzo, C., Stafoggia, M., Sozzi, R., Davoli, M., Forastiere, F., 2013. Long-Term Exposure to Urban Air Pollution and Mortality in a Cohort of More than a Million Adults in Rome. Environ Health Perspect 121, 324–331. https://doi.org/10.1289/ehp.1205862
(Chang, 2016)	Chang, J.-H., 2016. A genealogy of tropical architecture: colonial networks, nature and technoscience, The architext series. Routledge, London ; New York.
("Climat tropical — Wikipédia," 2017)	Climat tropical — Wikipédia [WWW Document], 2017. URL https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_tropical (accessed 6.17.17).
(de Dear and Brager, 1998)	de Dear, R., Brager, G.S., 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference.
(Dussud et al., 2015)	Dussud, F.X., Wong, F., Duvernoy, J., Morel, R., 2015. Chiffres clés du climat France et Monde - édition 2015, Repères. CDC climat recherche.
(F Picgirard - J Gandemer, 2012)	F Picgirard - J Gandemer, 2012. La ventilation naturelle en pratique.
(Faggianelli, 2014)	Faggianelli, G.A., 2014. Rafraichissement par la ventilation naturelle traversante des bâtiments en climat méditerranéen. Université de Corse - Pascal Paoli, France.
(Frampton, 2007)	Frampton, K., 2007. Modern architecture: a critical history, 4th ed. ed, World of art. Thames & Hudson, London ; New York, N.Y.
(Gauzin-Müller, 2001)	Gauzin-Müller, D., 2001. L'architecture écologique. Le Moniteur, Paris.
(Germano, 2006)	Germano, M., 2006. Qualitative modelling of the natural ventilation potential in urban context [WWW Document]. URL https://infoscience.epfl.ch/record/64372?ln=fr (accessed 5.9.17).
(Givoni, 1992)	Givoni, B., 1992. Comfort, climate analysis and building design guidelines. Energy and Buildings 18, 11–23. https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K
(Guilloux Tristan, 1997).	Guilloux Tristan, 1997. architectures coloniales à Brazzaville.
(Hallé, 2010)	Hallé, F., 2010. La condition tropicale: une histoire naturelle, économique et sociale des basses latitudes, Questions de société. Actes sud, Arles.
("La démarche négaWatt," 2016)	La démarche négaWatt [WWW Document], 2016. URL https://negawatt.org/La-demarche-negaWatt (accessed 6.17.17).

(Label ECODOM - enviroBOITE, 2012)	Label ECODOM - enviroBOITE, 2012.
(Lenoir, 2105)	Lenoir, A., 2105. On Comfort in Tropical Climates. The Design and Operation of Net Zero Energy Buildings. 236.
(Liébard and Herde, 2005)	Liébard, A., Herde, A. de, 2005. Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable ; [en 368 fiches didactiques]. Observ'ER [u.a.], Paris.
(Olgyay et al., 2015	Olgyay, V., Olgyay, A., Lyndon, D., Olgyay, V.W., Reynolds, J., Yeang, K., 2015. Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism, New and expanded edition. ed. Princeton University Press, Princeton.
(Pathak et al., 2008)	Pathak, V., Tripathi, B.D., Mishra, V. kumar, 2008. Evaluation of traffic noise pollution and attitudes of exposed individuals in working place. Atmospheric Environment 42, 3892–3898. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.12.070
(Santamouris, 2012)	Santamouris, M., 2012. Advances in Passive Cooling. Earthscan.
(Givoni, 1992), (Szokolay, 1986)	Szokolay, S.V., 1986. Climate analysis based on the psychrometric chart. International Journal of Ambient Energy 7, 171–182. https://doi.org/10.1080/01430750.1986.9675499
(Tantasavasdi et al., 2001)	Tantasavasdi, C., Srebric, J., Chen, Q., 2001. Natural ventilation design for houses in Thailand. Energy and Buildings 33, 815–824. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00073-1

Chapitre 1

Analyse comparative de l’architecture pré moderne, vernaculaire, coloniale en milieu tropical humide

Détail d’une maison thaïlandaise © VERNADOC

Dans ce chapitre nous allons faire une analyse comparative d’archétypes vernaculaires, prémodernes et coloniales et voir si nous pouvons en tirer des enseignements sur les formes architecturales en relation avec la localisation géographique.

Table des matières

1 Introduction 37
2 Revue de littérature 41
2.1 Architecture vernaculaire 41
2.2 Architectures pré coloniales ou non influencées 41
2.3 Architectures coloniales 42
2.4 Evolution de l'architecture coloniale réunionnaise 42
2.5 Architectures post coloniales 46
2.6 Définition des typologies étudiées 47
2.7 Problématique 47
3 Méthodologie 47
3.1 Sélection des archétypes étudiés 47
3.2 Résultat de la collecte: 48
3.3 Caractérisation des données collectées et critères de comparaison 48
3.4 Template d'étude des données 49
3.5 Analyse des données 53
3.6 Implantation géographique 53
4 Résultats et discussions – Analyse des données 57
4.1 Constitution des parois verticales: 57
4.2 Couleur privilégiée en zone tropicale : 59
4.3 Forme, pente de la toiture et matériaux utilisés 60
4.4 Porosité des parois 62
4.5 Ouvertures et protection solaire 63
4.6 Constitution des varangues 65
4.7 Quatre études de cas 68
5 Conclusion 74
6 Bibliographie 77

1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons tenter de voir s'il existe dans la zone tropicale des archétypes ou des caractéristiques communs dans l'architecture pré moderne, coloniale ou vernaculaire tropicale qui pourraient découler de contraintes climatiques communes et si celles-ci sont liées au potentiel de ventilation naturelle.

Comme le soulignait Angen (Angen, 2013) pour l'architecture vernaculaire elle s'est adaptée à son environnement naurel, nous allons tenter de voir comment :
« The same can be said about vernacular design: we can ignore it or be inspired by it;
Our ancestors learned how to live with the natural environment because they lacked
The technology to control it. »
« La même chose peut être énoncée à propos de l'architecture vernaculaire : nous pouvons l'ignorer ou s'en inspirer. Nos ancêtres ont appris à vivre avec leur environnement naturel parce qu'ils n'avaient pas à leur disposition la technologie pour le contrôler » (Angen, 2013).
De même Raymond Ayoub (Ayoub, 1960) dans la revue Techniques et Architectures soulignait l'influence du climat dans la tradition architecturale et la nécessité de s'en inspirer :

« Les traditions architecturales autant que les mœurs des populations trouvent leurs causes profondes dans le climat. L'erreur serait de rejeter l'expérience indigène au lieu de l'analyser et de voir dans quelle mesure une partie de cette expérience répond aux impératifs du climat et peut être améliorée. ».

Il apparait donc important de faire un « état des lieux » de la conception de l'architecture traditionnelle en milieu tropical et de l'influence du climat sur son évolution, pour mieux la comprendre et voir comment s'en inspirer. L'objectif n'est pas l'exhaustivité, le sujet est trop vaste. Il s'agit plutôt d'étudier et comparer un certain nombre de constructions antérieures à l'arrivée des systèmes actifs, de la technologie et plus particulièrement de la climatisation, qui a amené des bouleversements dans l'approche conceptuelle de l'architecture dans cette région du globe et d'en tirer d'éventuels enseignements. En particulier, peut-on retrouver des constantes, des invariants, ou au contraire y a-t-il des différences notables et pour quelles raisons (culturelles, géographiques, climatiques…) ? La recherche ou l'optimisation de la ventilation naturelle ont-ils joué un rôle dans cette architecture ?

En effet, on ne peut plus relayer la vision de Le Corbusier, malgré son immense talent et son influence déterminante sur l'architecture du 20ème siècle, lorsqu'il énonce sa vision d'avenir pour le contrôle du confort dans les bâtiments :

« La maison russe, parisienne, de Suez ou de Buenos Aires, le paquebot de luxe qui traverse l'équateur, seront hermétiquement clos. En hiver, il y fait chaud, en été il y fait frais, ce qui veut dire qu'en permanence, il y a 18° d'air pur et exact à l'intérieur. La maison est hermétique ! Nulle poussière désormais n'y pénètre. Ni mouches, ni moustiques. Pas de bruit ! » : (Le Corbusier conférence de presse à Buenos Aires 1929).

Lors de cette conférence, Le Corbusier expliquait que, grâce à la technologie, il allait être possible de contrôler exactement la qualité et la température du flux d'air dans un bâtiment, quelle que soit son implantation géographique. Un des corollaires de l'apparition de la climatisation fut l'uniformisation architecturale et la possibilité de l'émergence du style international. En effet cette invention permettait de ne plus avoir à faire avec le climat, en fermant portes et fenêtres on pouvait le contrôler et en particulier le climat intérieur siège du confort des utilisateurs (voir Figure 1- 1).

Figure 1- 1 : L'impérial – Architectonica 1979 Floride © Miami Architectures sous les tropiques

Avec le recul, notre prise de conscience environnementale et à la lumière de celle-ci on comprend mieux l'impact négatif de la science de l'époque, de l'énergie bon marché et des techniques sur le contrôle du climat intérieur des constructions. Cela a généré une coupure totale avec l'environnement extérieur avec les résultats que l'on sait en particulier en termes de consommation énergétique et de qualité de l'air intérieur (IAQ). Les bâtiments vernaculaires, qui n'avaient d'autre choix que de fonctionner en harmonie avec leur climat, se sont progressivement fermés grâce ou à cause des systèmes actifs, dont la climatisation.

La prise de conscience contemporaine de l'importance de la conception en milieu tropical et de ses spécificités semble avoir été marquée par la conférence de 1952 « Housing and building in hot-humid and hot dry climates » organisée par le BRAB (Building Research Advisory Board). Un certain nombre d'experts et d'architectes à l'instar de Fry et Drew, Olgyay and Olgyay, Dandy, comme les cite Joo-Ho Bay (Bay, 2001), pointent alors les spécificités du monde tropical et ses disparités avec le monde Occidental à prendre en compte pour un design efficient.

Ce constat de l'influence des systèmes sur la conception architecturale a été mis en évidence dès les années 60 avec le débat climatisation versus ventilation naturelle alimentant le clivage entre la vision de l'architecte et celle de l'ingénieur.("Technique et architecture n°2 février 1960," 1960).

Cette transformation de l'architecture, avec l'utilisation des systèmes actifs et l'utilisation massive du béton, s'est d'ailleurs largement confirmée en de nombreux points du globe à cette période, comme à Dakar : « L'emploi du béton réservé aux métropoles occidentales va permettre d'élever en hauteur les bâtiments. Quant à la ventilation, elle sera assurée artificiellement par des climatiseurs, comme cela est déjà le cas dans les constructions d'Amérique du Nord. Béton armé et climatiseurs vont en quelques années bouleverser le paysage urbain. »(Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993).

On relève encore au Nigéria : « Bien qu'il fût beaucoup question de tradition, surtout dans le discours politique de l'époque, les clients, eux, demandaient les immeubles les plus modernes, à l'image de ce qu'ils avaient vu à l'étranger. L'air conditionné permettait de ne plus tenir compte comme auparavant de facteurs climatiques, du moins tant que l'électricité ne faisait pas défaut ; mais le générateur d'appoint allait bientôt faire partie de l'équipement courant. La

technologie avait atteint son point de non-retour dans les centres urbains. » (Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993).

On peut, avec le recul de l'histoire, prendre en compte les conséquences désastreuses de cette idée d'une internationalisation possible de l'architecture. Elle a induit une lutte contre le climat et ses excès, compensée par des systèmes actifs, certes efficaces mais non durables et à l'obsolescence programmée, l'utilisation de nouveaux matériaux et le désir des pays en voie de développement d'adopter les styles architecturaux des pays développés.

Cependant le tournant réel provient de la compréhension de la finitude de nos ressources, dans un premier temps avec le premier choc pétrolier des années 1970, et dans un second temps avec le contexte climatique actuel. Ceux-ci ont généré une modification des comportements, de l'approche de l'architecture et de l'usage des systèmes. Giula Marino, dans sa thèse « Some like it hot »(Marino, 2014) le souligne en citant l'ingénieur suisse Olivier Barde : «il est indéniable que ni les arguments rationnels des responsables, ni les prises de positions émotives des défenseurs de l'écologie, n'auraient permis à la population de prendre conscience dans un délai raisonnable des nombreux problèmes liés à l'énergie. Le blocus énergétique déclaré par les pays arabes, fin 1973, nous a fait gagner plus de dix ans de ce point de vue, et rend à notre civilisation un service dont on n'a pas encore mesuré la portée ».

En revenant à une étude de l'architecture de la période que nous appellerons *pré-climatisation*, c'est-à-dire globalement avant la deuxième guerre mondiale, il est possible d'étudier une architecture, à coup sûr, exempte des modifications liées à ces systèmes actifs et à l'utilisation de matériaux inadaptés au climat tropical.

Concernant notre domaine d'étude de l'architecture vernaculaire tropicale, deux approches peuvent être distinguées : celle des pays colonisés et celle de ceux ne l'ayant pas été, comme la Thaïlande (ex royaume de Siam), ou d'avant la colonisation européenne. On peut alors se poser la question de savoir si des solutions originales ont été développées dans un cas comme dans l'autre, ou au contraire, les mêmes contextes ont-ils générés des solutions proches ?

Dès les débuts du colonialisme une réflexion a été menée sur la définition d'une architecture adaptée, tout en cherchant des solutions universelles au problème du confort : *« Colonialism can be viewed as a form of globalization »*(McGillick and Kawana, 2014) *« La colonisation peut être vue comme une forme de globalisation ».*

Cette approche était très largement motivée par les théories hygiénistes en vogue fin 19ème siècle début 20ème en Europe. «Les préoccupations sanitaires furent d'emblée présentes dans la politique coloniale, dans le souci notamment de préserver les vies européennes (Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993):

« Dans tous les pays chauds la maison doit être un sanatorium ou l'homme, chaque jour, retrempera ses forces. Dès lors il résistera plus énergiquement aux principes morbides du lieu et poursuivra, plus aisément, l'œuvre mère de la colonisation : l'assainissement des sols. »

« De l'habitation dans les pays chauds : contribution à l'art de l'acclimatation » ;(Dessolier, 1882)

Il est intéressant au passage de noter la référence aux préoccupations hygiénistes et de santé, la peur des maladies tropicales, que l'on retrouve régulièrement dans la littérature liée aux tropiques. Ils étaient déjà décrits à leur découverte par l'homme blanc comme *« Terra ihitabilis »*(Olgyay et al., 2015). Il est significatif que cette mappemonde sommaire indique la zone tropicale comme inhabitable (Voir Figure 1- 2)… L'homme occidental n'a eu de cesse par la suite d'essayer de s'y adapter et s'y implanter avec un habitat approprié.

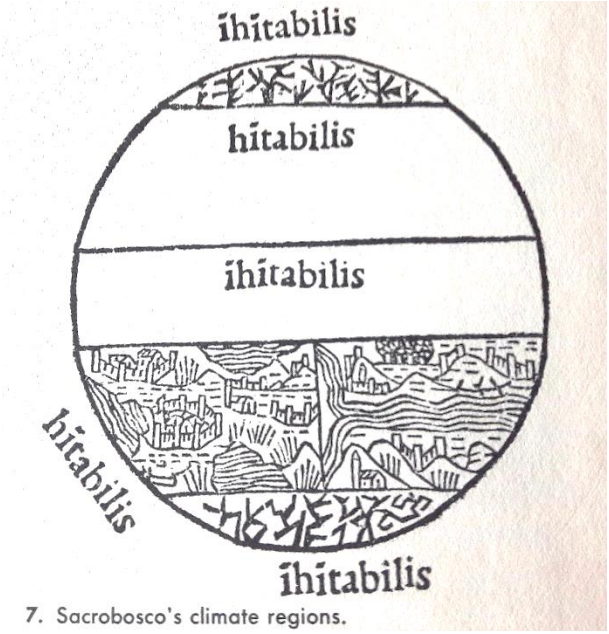


Figure 1- 2 : Schéma du globe – © De Sphaera Mundi – Sacrobosco 1230

Nous proposons donc de tenter de faire dans ce chapitre un état du savoir sur les architectures vernaculaires tropicales. Nous étudierons de manière comparative certains archétypes nationaux ou régionaux à partir d'un nombre de critères liés, entre autres au comportement climatique, thermique et en ventilation naturelle, ceux-ci étant intimement liés. Ce travail a déjà fait l'objet d'approches variées spécifiques à certaines typologie (Ghafar, 2014) pour l'architecture traditionnelle malaysienne ou plus transversales: (Plemenka, 1994) en prenant en compte le milieu humain, naturel et matériel.

L'intérêt des études de cas que nous proposons de faire est souligné par J Bay : « le cas de l'architecture tropicale, en général et plus spécifiquement à Singapour, est utilisé pour comprendre comment et pourquoi le design architectural est fait et les caractéristiques des problèmes rencontrés. Aussi la compréhension acquise est applicable à la pratique du design dans de nombreux pays à développement rapide dans la région qui partagent des préoccupations et des conditions de pratique identiques. »(Bay, 2001)

Nous nous intéresserons spécifiquement à un travail transversal au monde tropical. Nous tenterons de souligner les différences ou au contraire les similitudes entre des archétypes disséminés autour de la ceinture tropicale. Nous verrons quels enseignements en tirer, sur l'adaptation à des contextes climatiques comparables, mais aussi culturels et historiques très différents.

2 Revue de littérature

Nous allons tout d'abord faire un rappel de certaines définitions liées à l'architecture tropicale et vernaculaire.

2.1 Architecture vernaculaire

Une des définitions de l'architecture vernaculaire a été énoncée par Moutsopoulos « A côté de l'architecture monumentale préservée dans les différents pays du monde – dont la sauvegarde et la valorisation sont à la charge de l'UNESCO et de l'ICOMOS – survit et coexiste souvent une autre architecture plus réservée, qui comprend des édifices que l'on pourrait difficilement désigner de monument. La connaissance de l'architecture vernaculaire et les actions nécessaires à sa sauvegarde sont un processus qui unit les peuples contribuant essentiellement, au maintien de l'équilibre écologique et naturel et constitue donc en substance, une œuvre de paix et d'éducation nationale. » (Moutsopoulos, 1993). On peut aussi préciser qu'il s'agit d'une architecture sans architecte, utilisant des ressources et matériaux locaux. Elle est cependant soumise à de nombreuses influences contextuelles.
Rapoport, dans son livre (Rapoport, 1991) décrit les relations entre les déterminants culturels, climatiques et technologiques de cette architecture. Elle a fait l'objet d'une littérature riche et dans de nombreux pays , au Viet Nam (Anh-Tuan et al., 2011), en Thaïlande (Ismail, 2012), en Malaisie (Ghafar, 2014) et (Mohd Sabrizaa, 2014), en Chine (Borong et al., 2004),ou thématique avec l'architecture de terre (Stevens, 2015), elle est commune avec celle des architectures précoloniales, ci-après.

2.2 Architectures pré coloniales ou non influencées

Il s'agit ici, comme leur nom le précise, d'architectures vernaculaires antérieures à la colonisation, à ses apports théoriques et stylistiques ou originaires de pays n'ayant pas subi la colonisation, comme au Japon (Angen, 2013), et donc théoriquement vierges de cette influence (voir Figure 1- 3).

Ces architectures sont issues d'une évolution des modes d'habiter provenant d'une adaptation et d'une évolution des techniques de constructions et des sociétés les accueillant.

Il sera intéressant de comparer les solutions et les performances de ces habitats comme Weber (Weber and Yannas, 2014), non modifiées par les théories hygiénistes et les

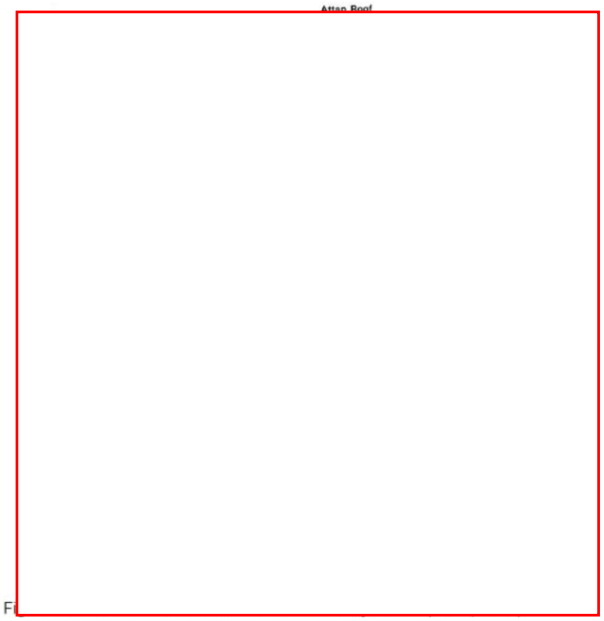


Figure 1- 3 : © The external Environment ot the Malay house. Yuan 1987

« techno sciences » modernes, avec celles issues du monde colonial et ses influences occidentales.

Le propos n'est bien sûr pas d'idéaliser ces modèles et de proposer une transposition de ceux-ci à l'époque actuelle, ce qui aurait peu de sens compte tenu des modifications de contexte social, économique, programmatique, mais de mieux les comprendre et en tirer des enseignements et applications adaptés au contexte actuel.

2.3 Architectures coloniales

Assez simplement, nous parlerons ici d'architectures issues de la période coloniale européenne en milieu tropical (voir) donc approximativement du 18ème siècle à la moitié du 20ème siècle. On peut en effet donner les années 1950 comme charnières de l'évolution stylistique dans les pays de cette zone, avec la diffusion du style international et la décolonisation de nombreux pays à l'issue de la seconde guerre mondiale et du droit des peuples à disposer d'eux même réaffirmé en 1945 par la charte des Nations Unies. On trouve une littérature fournie sur cette période, dans les DOM (Charlery, 2004), (Denise, 2004), mais aussi ailleurs, avec des ouvrages transversaux (Guaita, 1999),(Weiss, 1996), (James-Chakraborty, 2014), ou ailleurs, à Brazzaville (Guilloux Tristan, 1997), dans les anciennes colonies britanniques (Hobson, 2007).

Figure 1- 4 : © Ovidio Guata – la maison tropicale

2.4 Evolution de l'architecture coloniale réunionnaise

Il est intéressant de souligner une spécificité historique de la Réunion : avant sa colonisation en 1664, l'île était déserte de tout être humain. Il n'y avait donc pas d'architecture vernaculaire native. Tous les colons et habitants futurs sont donc arrivés avec leurs us et coutumes ainsi que leurs références architecturales. Cet état initial « vierge » de toute influence est une des composantes spécifiques de l'évolution de l'architecture Réunionnaise, ce qui la distingue des autres DOM-TOM et de nombreux autres pays de la zone tropicale humide. Ce sont donc uniquement des modèles importés, ayant « évolué » en s'adaptant au contexte culturel, climatique et technique, qui sont présents sur l'île (voir Figure 1- 5).

Figure 1- 5 : Evolution schématique d'une case créole réunionnaise : l'habitat tropical du modèle métropolitain (maison en maçonnerie et tuiles) à gauche, à son interprétation avec les matériaux locaux, le bois et la tôle (au milieu) et se « tropicalisation » avec ajout d'auvent, de varangue (à droite) (© auteur)

Comme pour l'étude de l'échantillon de maisons dans la zone tropicale étudiée dans le chapitre 1, il n'apparait pas envisageable de prétendre que l'analyse de la maison choisie permettra une quelconque généralisation à l'ensemble des maisons créoles de La Réunion. Elles diffèrent toutes par un ou plusieurs paramètres, taille, orientation, localisation…Elles ont aussi un certain nombre de points communs. Dans tous les cas on pourra évaluer le confort d'une maison traditionnelle réunionnaise en faisant en sorte qu'elle soit la plus représentative possible. Une bonne connaissance de l'architecture traditionnelle réunionnaise doit donc nous permettre d'évaluer la pertinence du choix de la maison que nous étudierons dans ce chapitre.

Nous avons cherché à collecter des documents graphiques (localisation, plan de masse, coupe, façades) de cases créoles traditionnelles pour nous permettre d'établir ce lien et cet aspect représentatif.

Pour cela nous avons, entre autres, consulté les relevés d'environ cinquante Monuments Historiques Inscrits ou Classé de type maison ou domaine Réunionnais, grâce au fond du Service Départemental de l'Architecture et du Patrimoine (SDAP – DAC Océan Indien). La Figure 1- 6 ci-dessous montre des exemples représentatifs de ces monuments historiques réunionnais.

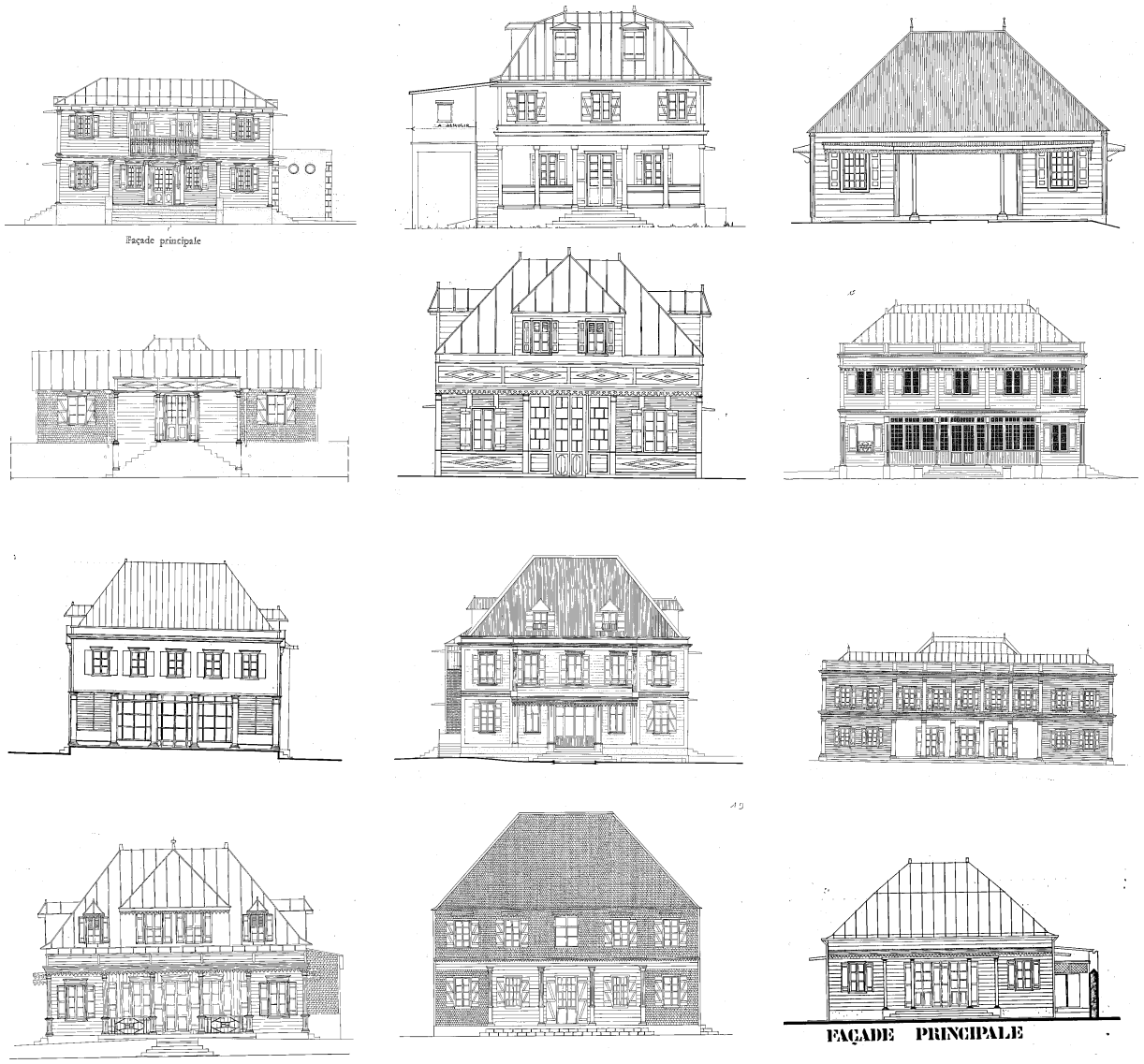


Figure 1- 6: Exemples de monuments historiques de La Réunion – façades principales -© Service Départemental de l'Architecture et du Patrimoine de La Réunion – DAC Océan Indien

L'aperçu ci-dessus et l'analyse des différents relevés nous permettent d'identifier des points communs à des différentes architectures :

- Implantation au centre de la parcelle, face à la rue pour les cases urbaines ;
- Composition symétrique du plan et de la façade ;
- Volumétrie principale de toiture avec toit à 4 pans en tôle (zinc sur tasseau ou tôle plane ou ondulée en acer) ;
- Construction en pan de bois avec bardage en clin de bois ou bardeaux, ou en maçonnerie de moellon enduite à la chaux ;
- Ouvertures de proportions verticales, protégées par des volets en bois ;
- Présence d'une ou plusieurs varangues sous combles ou intégrée ;
- Environnement de la case planté d'un jardin « à la Française » sur l'avant et d'une cour plantée de fruitiers sur l'arrière.

L'histoire de l'architecture Réunionnaise nous conforte dans le choix d'un archétype largement répandu : « L'architecture créole réunionnaise a hérité du XVIIème siècle un type de maison dit « maison pavillon », apparu dans les années 1730. Partout dans l'île, ce modèle s'est perpétué au XIXème siècle et au cours de la première moitié du XXème siècle» (Leveneur, 2007)

Ces observations sont corroborées par le document « connaissance de l'architecture réunionnaise» :(Rivière Noyre, 1980). Il y décrit une case Réunionnaise fictive type (voir Figure 1- 7) : «la case créole urbaine est surtout caractérisée par sa façade. Son plan, les relations qu'elle entretien avec la rue ou le jardin répondent aux contingences d'un modèle culturel et d'un environnement naturel particulier ».

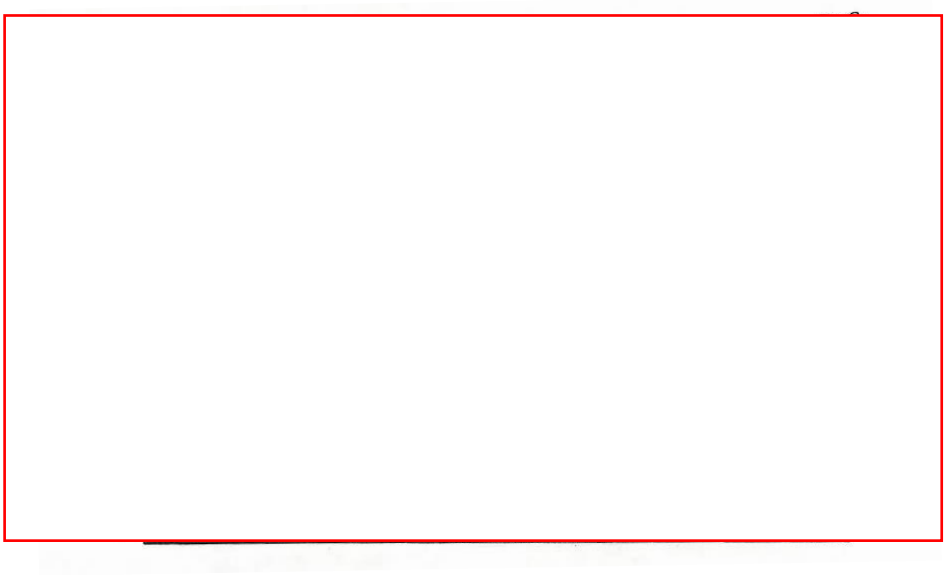


Figure 1- 7: Illustration case type – connaissance de l'architecture Réunionnaise.pdf, p48

On peut aussi s'appuyer sur le plan d'une case créole type décrit dans (Etave, 1983).

On retrouve les constantes suivantes :

L'implantation de la façade principale face à la rue.

- La symétrie du plan ;
- La varangue intégrée ;
- Les pièces traversantes ;
- La toiture principale à 4 pans.

Mais aussi les matériaux employés :

- Les bardages ;
- Les sols et plafonds en bois ;
- La couverture tôle ondulée ou tôle sur tasseaux.

On trouve aussi ces caractéristiques dans la notice Grands Domaines (Bertil et al., 1997) ou dans le livre de Leveneur (Leveneur, 2007).

2.5 Architectures post coloniales

Dans la seconde moitié du 20ème siècle est apparue dans les anciennes colonies une architecture que l'on peut qualifier de post coloniale. Il est intéressant de noter la relative concomitance de la fin du colonialisme avec l'apparition massive des systèmes actifs et en particulier de la climatisation et ses bouleversements stylistiques. Ce point est d'ailleurs souligné et noté en de nombreux points du globe, comme pour le quartier du Plateau à Abidjan :

« Cette poussée des tours, immeubles de bureaux, cette densification énorme du calme quartier du Plateau, cette adoption enthousiaste de l'architecture moderne et banale de style « international », ne furent possibles qu'avec la diffusion des techniques de climatisation artificielle, dans les années soixante. La Côte d'Ivoire nouvellement indépendante voulait se démarquer de l'image coloniale et promouvoir un style exprimant sa richesse et son prestige. »(Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993).

Figure 1- 8: Brasilia congrès national (1958) Oscar Niemeyer architecte- Brésil © Latin America in construction : architecture 1955-1980.

Cette convergence temporelle, avec le rejet des modèles anciens a généré un réel bouleversement et une aspiration vers l'architecture dite « moderne » (Bergdoll et al., 2015), que l'on peut encore ressentir aujourd'hui (voir Figure 1- 8). Cela va au-delà de l'architecture et pourrait s'étendre au mode de vie à l'occidentale ou encore au fameux « American way of life » et ses modes de consommation.

2.6 Définition des typologies étudiées

« La typologie est un mode de classement d'objets. Ce mode est déterminé par la recherche des filiations précises ». Cette définition de Lamunière (Lamunière, 1988) explicite notre démarche de recherche de certains caractères communs à différentes architectures, partageant un climat commun.

Le périmètre de recherche a volontairement été limité à la typologie architecturale de la maison individuelle. Elle assure un des premiers besoins de l'homme, se protéger des éléments. On retrouve cette approche dans (Frey, 2010) qui affirme *« once understand the problems of the house and much else becomes clear » : «une fois que les problèmes liées à la maison sont compris, beaucoup d'autres deviennent évidents ».* Ce sont ces évidences communes qu'il sera proposé de déterminer.

Par ailleurs, afin d'être représentatif de solutions intéressantes à étudier dans le cadre de ce travail de recherche, la date de construction des maisons considérées doit être antérieure à l'arrivée de la climatisation. Elle a, de manière évidente, modifié la conception architecturale, comme nous l'avons souligné précédemment. Nous présenterons donc des archétypes fonctionnant sans climatisation.

2.7 Problématique

De nombreuses études ont été menées pour évaluer les performances thermiques et/ou de confort de ces architectures anciennes, ou pour les décrire individuellement. Il nous est apparu intéressant de tenter une étude comparative de typologies architecturales.
Le sujet étant très vaste, nous nous sommes limité à une étude qualitative et à tenter de répondre aux questionnements suivants :
Un climat commun ou pour le moins proche a-t-il pu produire des typologies architecturales originales et communes, malgré une forte dispersion géographique et temporelle, à une époque ou la physique des bâtiments n'avait pas cours. ?
Pour quelles raisons ces solutions sont-elles communes ?

3 Méthodologie

Afin de mettre en évidence certaines caractéristiques architecturales de maisons traditionnelles en milieu tropical humide, il en est proposé, dans cette partie, une analyse comparative. Elle est faite sur la base des données recueillies lors de cette recherche. Celles-ci proviennent de la zone intertropicale humide et regroupent un minimum d'informations essentielles : situation, climat, plan masse, plans, coupes et façades de manière à pouvoir en faire une analyse comparative chiffrée.

3.1 Sélection des archétypes étudiés

La sélection des archétypes s'est faite selon plusieurs critères. Une part de la difficulté de l'exercice comparatif est de travailler sur un échantillon, qui, de manière idéale, devrait être représentatif. Cependant cette notion parait difficile à établir scientifiquement pour un échantillon de constructions.

- Nous nous sommes donc concentrés sur des bâtiments dont l'aspect historique était établi par exemple par l'Inventaire Supplémentaire des Monument Historiques (ISMH), pour les bâtiments provenant des DOM-TOM, la bibliothèque nationale du Congrès pour les Etats Unis, des ouvrages publiés de référence pour d'autres sources telles que la Chattel house à la Barbade ("Thematic Expert Meeting on Wooden Urban Heritage in the Caribbean Region," 2003), des bâtiments « type » et de ce fait jugés représentatifs du pays, ou plus souvent de la région, d'implantation (maison Tamoule traditionnelle de l'Inde, maison indonésienne…) . Le fait d'avoir pu obtenir ces éléments atteste déjà, d'une certaine façon, de leur représentativité, en tout cas de leur intérêt ;
- Un autre critère était la possibilité d'obtenir des informations suffisantes pour une étude comparative, à savoir : localisation exacte (données GPS), plan de masse avec l'environnement, plans de nivaux, coupes et façades ;
- Une répartition géographique aussi large que possible a aussi été recherchée, toutefois, afin de garder un contexte climatique comparable, les modèles étudiés sont implantés dans la zone de basse altitude, à savoir sous les 400m afin de ne pas subir de modifications des conditions de température liées à celle-ci. Ce choix s'appuie sur le référentiel PERENE (LPBS and IMAGEEN, 2009) délimitant des zones géographiques en fonction (entre autre) de l'altitude pour l'ile de La Réunion. En effet il définit une « zone des bas » correspondant à cette altitude inférieure à 400m et qui correspond aux caractéristiques d'un climat tropical humide.

En l'absence de documents graphiques exploitables à des fins quantitatives, une nombreuse iconographie a permis d'observer les similitudes et disparités stylistiques.

3.2 Résultat de la collecte:

Au final, il a été collecté environ 190 maisons (données graphiques diverses : plans, coupes, façades complètes ou partielles), implantées dans une vingtaine de pays ou régions en zone tropicale humide. 120 données graphiques étaient globalement utilisables (plans, coupes façades). 32 on fait l'objet d'une analyse détaillée et qui sont présentés dans le tableau 1-1 ci-après, sur la base d'une répartition géographique la plus diversifiée possible.

3.3 Caractérisation des données collectées et critères de comparaison

La recherche bibliographique initiale s'est attachée à regrouper un maximum de relevés (plan masse, plans, coupes et façades) et d'étudier un certain nombre de paramètres, liés à la notion de confort thermique.

En milieu tropical les paramètres déterminants sont évoqués dans (Fry and Drew, 1974) *« They are three main considerations influencing architectural design in the tropic which is necesseray to distinguish as belonging particularity to the zone. These concern, first, people and their needs ; second, climate and its attendants ill ; and third, materials and the means of building. » : « Il y a trois principales considérations influençant la conception architecturale dans les tropiques qu'il est nécessaire de distinguer comme des particularités propres à la zone. Ce sont, en premier les gens et leurs besoins, en second le climat et ses maladies liées, en troisième les matériaux et les techniques de construction. ».*

Ce travail se concentrera essentiellement sur les deuxième et troisième paramètres : le climat, les matériaux et techniques de constructions.
Les données collectées seront :

- L'implantation géographique ;
- Les éléments architecturaux :
    - La constitution des parois ;
    - La forme et pente de la toiture ;
    - Les ouvertures et les protections solaires ;
    - La présence et nature des varangues ;
    - Le pourcentage d'ouvertures (porosité, voir définition en annexe 1).

Ces éléments permettront de comparer les différents cas d'étude afin d'appréhender le potentiel de ventilation naturelle et aussi de confort lié à la conception de l'enveloppe.

3.4 Template d'étude des données

Afin d'harmoniser la comparaison, chaque cas a été analysé et étudié selon un template commun. Nous nous sommes inspirés du travail réalisé dans le programme LETCHI auquel nous avons participé. Initié par l'ADEME (Agence De l'Environnement .et de la Maîtrise de l'Energie) ("Tropical Buildings," n.d.).Il a permis l'élaboration d'un document type devant servir à la mise en place d'une base de données comparative entres différents projets architecturaux issus de l'Inde, du Viet Nam, la Thaïlande, le Sri Lanka et La Réunion. Notre travail pourra enrichir cette base de données de manière utile.

Le template nous permet de regrouper les informations d'une maison selon plusieurs catégories. Nous prendrons l'exemple de la maison Whitney Plantation située aux Etats-Unis pour illustrer notre propos.

Tout d'abord, le document est divisé en deux pages : la première permet une description générale de la maison et de son climat local ; la seconde précise les techniques utilisées (critères architecturaux et constitutifs) ainsi que le contexte environnemental.

3.4.1 Première page du template

En début de la première page se trouvent le nom et une photographie de la maison ainsi que sa localisation, à savoir le pays et les coordonnées géographiques (latitude, longitude) complétés par la position de la maison sur des cartes à l'échelle du pays, de la ville et du quartier (Voir Figure 1- 9).

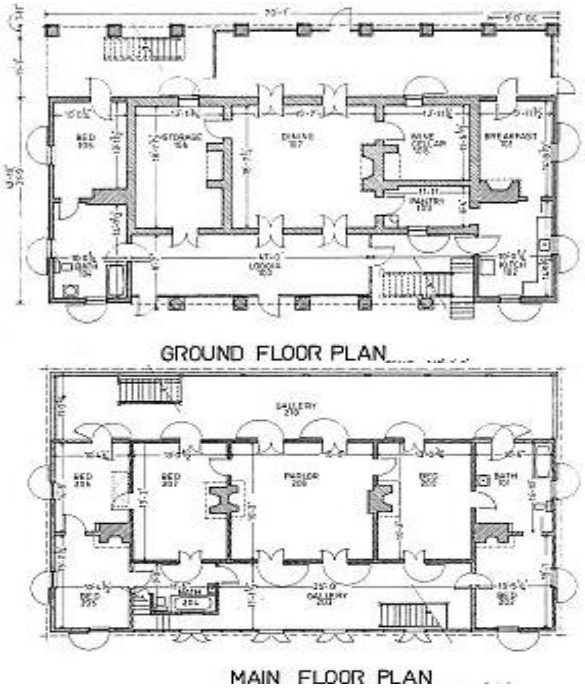
En outre, une partie est réservée à la description du bâtiment. Nous y avons écrit un bref récit sur l'historique de la maison (quand il était disponible) et mis les plans des étages et de quelques façades (Voir Figure 1- 9).

Une autre partie relève du climat local avec sa description selon la classification de Köppen-Geiger, les températures extrêmes ou moyennes, la pluviométrie, etc. La rose des vents ainsi que le diagramme solaire du lieu ont été ajoutés (Voir Figure 1- 9).

La dernière catégorie pour la première page, sur le côté gauche, concerne les caractéristiques de la maison telles que le type de construction (neuf ou rénové), la surface nette, la date d'achèvement de l'ouvrage voire de sa rénovation (Voir Figure 1- 9)

Whitney Plantation / Etats-Unis louisiane

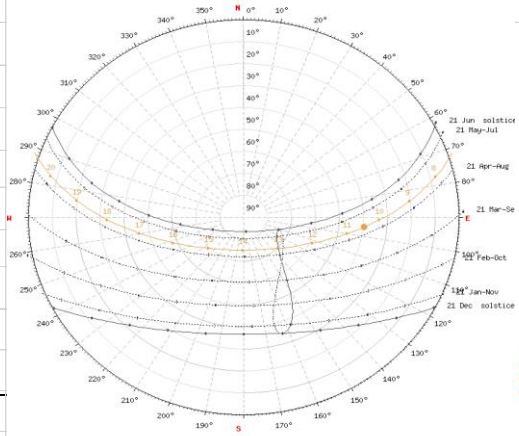
BUILDING DESCRIPTION



C'est une maison sur deux niveaux avec une galerie et une varangue à l'étage côté Nord et une varange en RDC côté Sud. La maison est traversante dans le sens Nord-Sud.

Copyright measured drawings, Library of Congress, USA

CLIMAT ANALYSIS



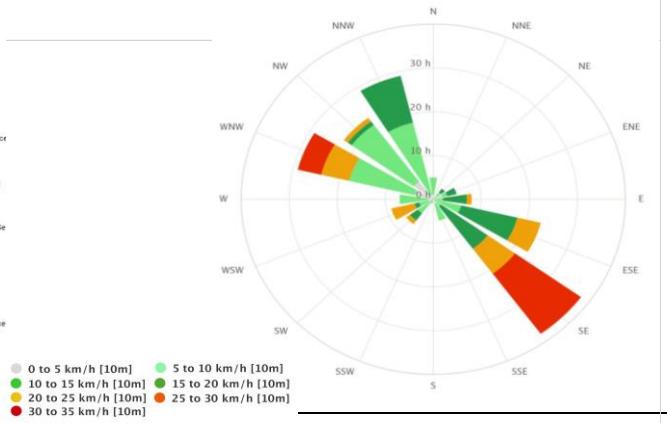


Figure 1- 9: Page 1 du template Whitney Plantation (© Library Of Congress)

3.4.2 Deuxième page du template

La seconde page du template précise le contexte environnemental du site, i.e. la présence de végétation ou de bâtiments à proximité (Voir Figure 1- 10).

Les techniques passives sont illustrées par des photographies et par l'orientation de la maison en fonction du diagramme solaire et de la rose des vents ; ce qui permet de comprendre le choix de ces approches passives (Voir Figure 1- 10).

Enfin, le long de la page à gauche (Voir Figure 1- 10) se trouvent des renseignements sur :

- Les acteurs qui ont participé à la construction de la maison ;
- L'enveloppe du bâtiment, à savoir :
    - La forme de la toiture et ses matériaux ;
    - Les matériaux constituant les murs ;
    - Les types de protection solaire utilisés pour les ouvertures.
- La ventilation naturelle, c'est-à-dire :
    - La potentialité d'une ventilation naturelle traversante ;
    - La porosité moyenne ;
    - La porosité entre façades opposées.

Ces renseignements permettent d'évaluer, en partie, le potentiel de rafraichissement passif. En effet ils se réfèrent à la conception aérothermique (F Picgirard - J Gandemer, 2012) et aux paramètres architecturaux la constituant. Ils avaient aussi été abordés à la genèse de la discipline naissante de l'ingénierie climatique (Olgyay et al., 2015). Nous n'aborderons pas ici l'environnement des constructions faute d'informations fiables sur celui-ci et sa possible évolution depuis la construction. Nous verrons ultérieurement, dans les chapitres 2 et 3 qu'il est aussi déterminant.

Cet exemple illustre un modèle typique d'architecture coloniale du Sud des Etats Unis. On y trouve un ordonnancement de la façade symétrique inspirée de l'architecture néoclassique en vogue dans les métropoles à l'époque. Un grand toit à quatre pans couronne le tout. La présence de cheminées laisse imaginer des hivers frais dus à une situation tropicale de 30° nord.

Ses dispositifs passifs sont ici : une double galerie à étage faisant office de protection solaire et une organisation interne traversante pour les pièces principales, tant au rez de chaussée qu'à l'étage. Elle propose une porosité moyenne de 14%, mais plus notable la porosité Nord Sud, entre façade avant et arrière et dans le sens d'une organisation interne débitante, est d'environ 20%.

BUILDING TEAM

Building Owner :

?

Architect :

?

General Contractor :

?

Mechanical Engineer :

?

Energy Modeler :

?

Lighting Design :

?

Structural, Civil Engineer :

?

Environmental Consultant :

?

SITE PLAN

Cette maison de maître se situe au abord du Mississippi dans un grand terrain d'exploitation agricole. Elle est entourée sur trois de ses côtés (Est, Ouest, Nord) par une petite forêt dessinant l'entrée à la demeure.
Tout le site est composé de maisons pour ceux qui y travaillaient, d'une chapelle et d'autres bâtiments annexes.Le reste du terrain sont des champs.

BUILDING ENVELOPE

ROOF

Type : 4 pans

Materials (ext to int):

La charpente est en bois avec une couverture bardeau bois

WALLS

Materials (ext to int) :

La structure est en ossature bois recouvert par un bardage bois horizontal à l'étage. Et en pierre de taille pour le RDC

Glazing Percentage :

WINDOWS
SOLAR SHADING

Débord de toiture

volet plein

NATURAL VENTILATION

Cross natural vent.

☑ Yes ☐ No

Porosity : 14%

PASSIVE APPROACHES

-cheminée en brique

-bardeau bois

-bardage bois

-mur pierre

-charpente bois

Les porositées entre les façades Nord et Sud sont:
- Nord : 18%
- Sud : 21%

Les porositées entre les façades Est et Ouest sont:
-Est : 8%
-Ouest : 8%

Figure 1- 10: Page 2 du template Whitney Plantation (© Library Of Congress)

3.5 Analyse des données

L'évaluation de ces paramètres montrera un comparatif de certains paramètres déterminant le potentiel de confort des maisons étudiées.

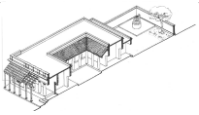
Elle permettra aussi d'observer différents archétypes et d'en déterminer les points communs ou au contraire les disparités et d'en tirer des enseignements pour une meilleure connaissance comparative de l'architecture vernaculaire tropicale et de sa genèse.

L'utilisation d'Excel permettra de faire une analyse quantitative et représentative du panel choisi.

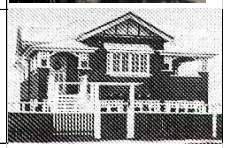
3.6 Implantation géographique

L'échantillon étudié en détail est constitué de 32 maisons réparties dans la zone tropicale, allant d'environ 30° Nord à 22° Sud. (Voir Tableau 1- 1 et Figure 1- 11).

Tableau 1- 1: Echantillon et localisation (pays et latitude) des maisons étudiées dans la zone tropicale

Maison	Localisation	Latitude	
Governor Dupré	Etats-Unis	30°	
Glendale Plantation	Etats-Unis	30°	
Whitney plantation	Etats-Unis	30°	
Villa Meilleur	Etats-Unis	29°	
Jackson Barracks Officer Quarter	Etats-Unis	29°	
Destrehan Plantation 1717 / 1840	Etats-Unis	29°	
Don Manuel Solana House	Etats-Unis	29°	
Ortega Macmillan House	Etats-Unis	29°	
G F Bartlum Roberts House	Etats-Unis	24°	
Washington Place	Hawaï	21°	
Mission Frame House	Hawaï	21°	
Maison Aimé Césaire	Martinique	14°	
Habitation La Sucrière	Martinique	14°	
Maison tamoule traditionnelle	Inde	14°	

Chattel House maison traditionelle	Barbades	13°	
Maison 109	Thaïlande	13°	
Maison 99	Thaïlande	13°	
Maison 123	Thaïlande	13°	
Maison traditionnelle malaisienne	Malaisie	2°	
Maison urbaine	Seychelles	-4°	
Maison de M. POTHIN	Seychelles	-4°	
Maison Tropicale	Afrique	-4°	
Maison Militaire	Afrique	-4°	
Maison Burnett	Australie	-12°	
Ancienne maison des notaires	Ile de La Réunion	-20°	
Domaine Bang	Ile de La Réunion	-20°	

Maison du Docteur Edwards	Ile de La Réunion	-21°	
Gendarmerie de Pouembout	Nouvelle Calédonie	-21°	
Maison Bachir Vally	Ile de La Réunion	-21°	
Maison Orré	Ile de La Réunion	-21°	
Maison Levieux	Ile de La Réunion	-21°	
Maison Queensland	Australie	-27°	
Maison traditionelle non influencée			

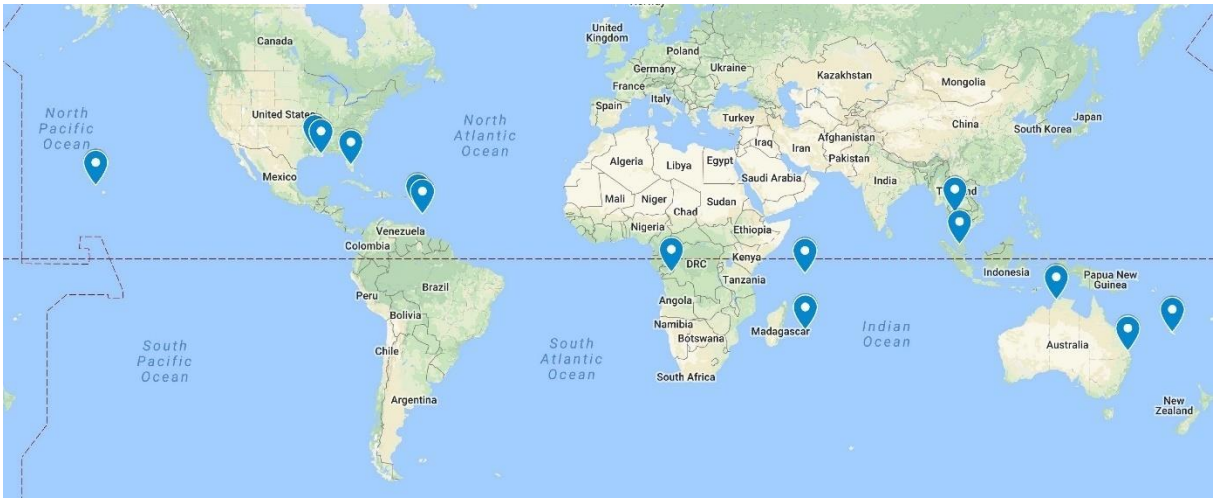


Figure 1- 11: Localisation géographique (© carte du monde) des maisons étudiées (nota la base de données comprend 32 cas)

4 Résultats et discussions – Analyse des données

Comme nous l'avons vu précédemment, cette section présente les résultats selon les critères suivants :

- Matériau ;
- Pente et forme de la toiture ;
- Porosité ;
- Ouvertures et protection solaires ;
- Répartition des varangues

Ils ont été répartis par groupe de latitude de 0° à 15° pour les exemples que l'on pourra qualifier d'équatoriaux et de 15° à 30° pour ceux que l'on qualifiera de tropicaux. Ce choix arbitraire permet une approche géographique dans la zone d'étude.

4.1 Constitution des parois verticales:

La constitution des parois constitue un des paramètres principaux influant sur le potentiel de confort d'un logement. On peut la caractériser par un facteur solaire, tel que défini en annexe 1.

Le choix de la constitution des matériaux des parois peut être déterminé par deux origines différentes :

Pour l'habitat vernaculaire « non influencé », ils proviennent exclusivement des matériaux disponibles aisément à proximité du site. En milieu tropical, la présence abondante du bois a souvent justifié ce choix, au-delà des autres avantages de ce matériau (facilité de mise en œuvre, bonne adaptation au contexte…).

Pour l'habitat colonial, il peut résulter de choix issus de la métropole d'origine. Les colonies servaient de débouchés industriels à la production métropolitaine, comme le précise l'historien Réunionnais Bernard Leveneur (Leveneur, 2007): « Le schéma Réunionnais est le même que l'Anglais, le Hollandais et le Portugais (au début sous forme de comptoirs et ensuite plus colonialiste) (avec une diffusion par les expositions universelles) c'est l'Europe qui diffuse les modèles jusqu'aux années 1960 ». C'est ainsi que l'on retrouve des maisons préfabriquées en construction métallique importées (maison du gouverneur à Mayotte, Palaver Haus Kamerunstadt Cameroun, maison Zevalos Le Moule Guadeloupe, ou plus récemment la

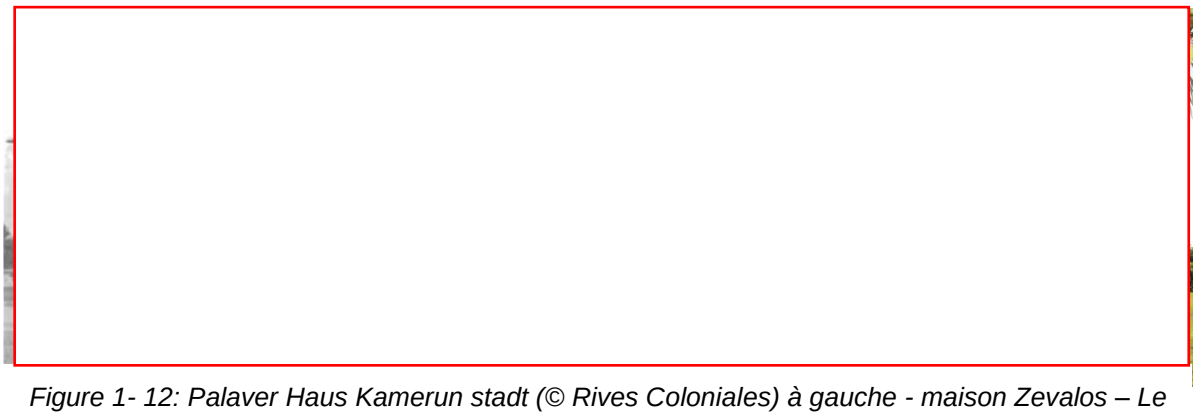


Figure 1- 12: Palaver Haus Kamerun stadt (© Rives Coloniales) à gauche - maison Zevalos – Le Moule – à droite

maison tropicale de Jean Prouvé (Prouvé, 2009)…) dans différentes ex-colonies, ou encore des systèmes mixtes, bois/acier (voir Figure 1- 12).

Le choix des matériaux de construction est expliqué par (Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993) qui écrit : «l'un des problèmes majeurs auxquels les Européens se trouvaient confrontés en permanence sur les côtes occidentales de l'Afrique était le manque de matériaux pour les constructions en dur. On dut donc importer ces matériaux d'Europe et de grandes quantités de briques arrivèrent sous forme de lest dans les navires. ».

L'observation de notre échantillon révèle l'utilisation des matériaux de parois suivants (Voir Figure 1-13) avec des fréquences variables :

- Fibres végétales ;
- Bois ;
- Maçonnerie de moellon ;
- Béton.

On retrouve le panel classique des matériaux de construction pour l'habitat.

Peut-on néanmoins caractériser l'utilisation de certains matériaux selon des critères géographiques ?

Matériau utilisé selon la latitude :

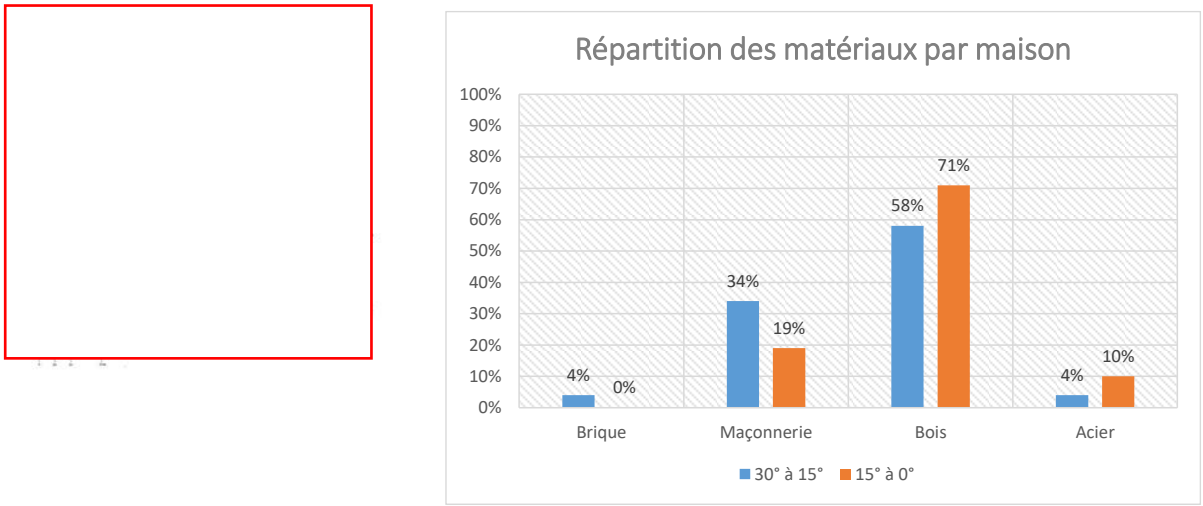


Figure 1- 13: Répartition des types de matériaux de paroi selon la latitude (à droite) – illustration d'une maison en bois en Thaïlande (à gauche) – © VERNADOC

On constate sur la base de l'échantillon étudié la tendance suivante : Plus de 70% des maisons utilisent le bois en zone tropicale proche de la zone équatoriale et moins de 60% en zone tropicale proche de la zone tempérée (voir Figure 1- 13). La part maçonnerie moellon augmente significativement en se rapprochant des Tropiques. Nous sommes dans une période où le béton n'est pas encore, ou très peu utilisé. Cependant, lorsqu'on y a recours, il est adopté dans la zone tropicale proche de la zone tempérée.

On peut observer une tendance à une variation des matériaux de parois utilisés selon la latitude.

Plus la latitude diminue en valeur absolue (plus on se rapproche de l'équateur), plus on utilise le moellon puis le bois, à hauteur de 100 % pour une latitude comprise entre 2° à 10° en valeur absolue.

L'explication vient probablement de la variation de l'inertie thermique des matériaux : le bois possède une inertie thermique légère et le moellon une inertie thermique plus importante. Pour éviter le stockage inertiel et son corollaire le déstockage et limiter ainsi la chaleur et le rayonnement, sources d'inconfort dans les maisons en zone tropicale, on utilisait des matériaux à faible inertie. Ceci d'autant plus que l'on se rapproche des zones équatoriales plus chaudes.

La référence à la maison Levieux renvoie à l'exemple de maison traditionnelle réunionnaise étudiée dans le chapitre deux.

4.2 Couleur privilégiée en zone tropicale :

Le blanc ou le beige sont les couleurs qui semblent largement privilégiées en zone tropicale. Cette tendance peut s'expliquer par l'absorptivité d'une paroi qui est plus faible pour une couleur claire et inversement pour une couleur plus foncée. Ceci expliquerait cette préférence pour le blanc ou le beige. Ces couleurs étaient facilement disponibles par l'usage de la chaux de couleur blanche et des pigments minéraux (terres). Le confort thermique y est aussi meilleur grâce à un meilleur facteur solaire (voir définition en annexe 1) pour les parois blanches ou de couleur claire.

4.3 Forme, pente de la toiture et matériaux utilisés

La forme et la pente de la toiture sont très souvent déterminées par la nature du matériau de couverture. Les couvertures végétales (fibre de coco, de palmier ou encore en bardeau de bois) nécessitent, pour des raisons d'étanchéité, une pente minimale d'environ 45°. Les couvertures en produits manufacturés (tuiles, tôle) admettent quant à elle des pentes plus faibles (jusqu'à 15°).

On peut affirmer que les premières sont essentiellement utilisées par les architectures vernaculaires et sont issues des ressources locales. Comme le souligne Denise en citant Jean Baptiste Delawarde : *« La seule chose qui semble devoir être retenue de la tradition caraïbe est la technique du couvert, la façon d'utiliser les matériaux du pays, feuilles de latanier, de balisier, de palmiste et de roseaux qu'on fixait avec des lianes souples sur des gaulettes, pour obtenir de grandes tuiles végétales couvrant la toiture et fermant les deux extrémités de la hutte »*(Denise, 2004).

Pour les secondes leur choix va dépendre essentiellement de la métropole d'origine : « Pour ce qui concerne les matériaux et les techniques, l'administration coloniale va consacrer le règne de l'importation massive »:(Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993) . Ces territoires étant des débuchés naturels de la production industrielle des pays d'origine.

L'observation de notre échantillon révèle l'utilisation des matériaux de toiture suivants (Voir Figure 1- 14) avec des fréquences variables :

- Fibres végétales ;
- Tôle (acier et zinc) ;
- Tuiles ;
- Argamasse (toiture terrasse).

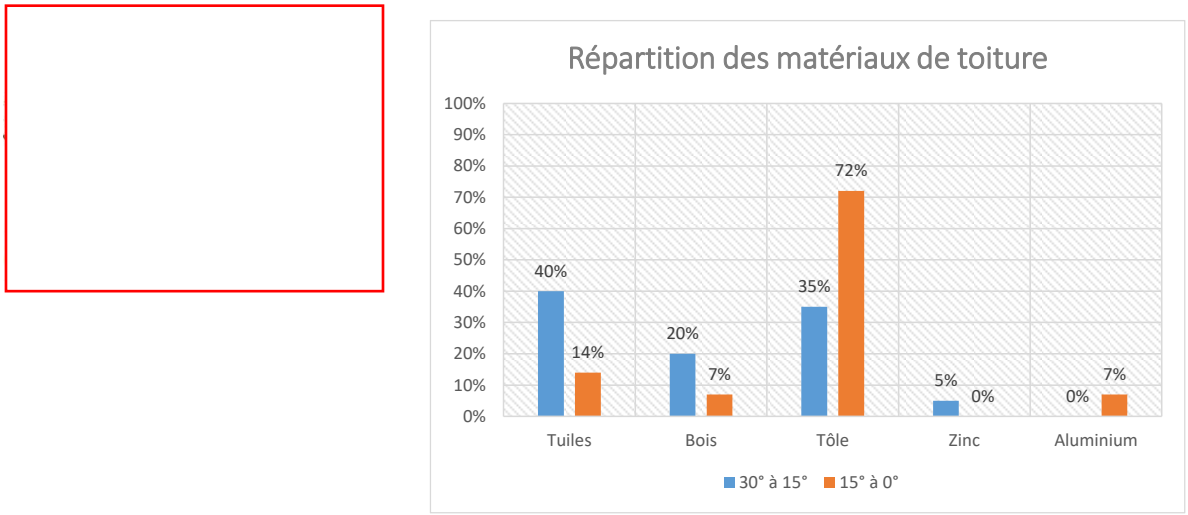


Figure 1- 14: Répartition des types de matériaux de toiture selon la latitude (à droite) – dessin d'une case couverte en tôle (©Island Homes Eichler de Saint Georges) (à gauche)

On retrouve un panel classique des matériaux de construction pour l'habitat. On peut observer dans l'échantillon une forte présence de tôle d'acier et de tuiles. Les tôles étaient importées des métropoles d'origine comme débouché de la sidérurgie en pleine expansion fin19ème et

début 20ème. Les tuiles étaient, soit produite sur place, soit importées à fond de cale comme lest pour les navires. Il semble plus hasardeux de trouver des variations en fonction de la latitude.

L'observation des pentes de toiture et du nombre de pans (voir Figure 1- 15) permet de noter une tendance à des pentes plus fortes, ainsi qu'une fréquence plus marquée des toits à 4 pans au niveau des tropiques par rapport à l'équateur. Au-delà du choix des matériaux, générant des pentes différentes, on peut avancer l'hypothèse de l'impact de la présence de cyclones dans la première zone et de la meilleure résistance des fortes pentes et des toits à quatre pans à ce phénomène (diminution de la dépression en toiture).

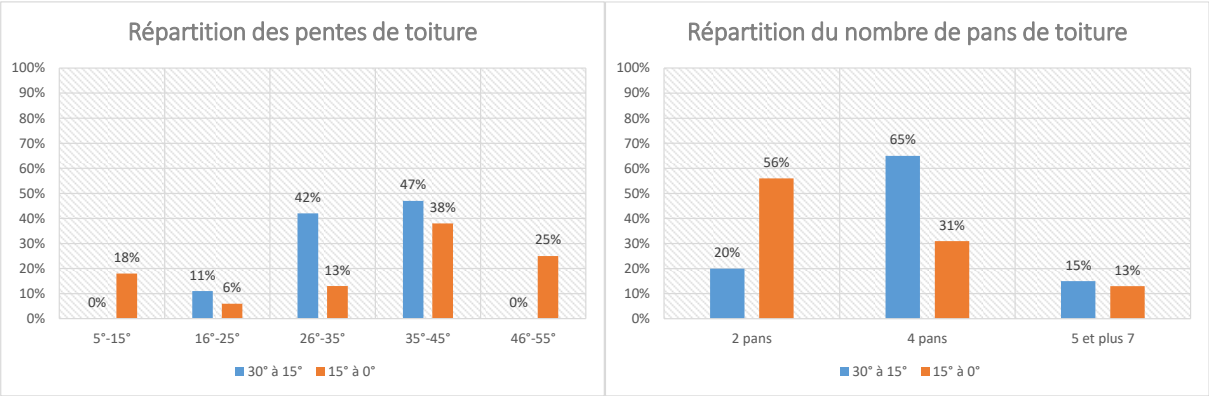


Figure 1- 15: Répartition des pentes de toiture (à gauche) et variation du nombre de pans de toiture selon la latitude (à droite)

4.4 Porosité des parois

La porosité des parois ou taux d'ouverture est un critère particulièrement déterminant dans le confort en milieu tropical, il constitue un des éléments dimensionnant du potentiel final de vitesse d'air dans le bâtiment ou le local étudié. Comme le rappelle Tareb (Tareb, 2006)

« L'effet du vent sur un bâtiment se traduit par des pressions positives sur les façades au vent et au contraire des dépressions sur les façades sous le vent, créant ainsi un écart de pression significatif à travers l'ensemble du bâtiment qui conduit à l'établissement d'un débit d'air traversant dès lors que les façades sont perméables. ». (F Picgirard - J Gandemer, 2012).

La perméabilité des façades est essentielle à l'établissement d'un débit d'air traversant et donc à l'efficacité de la ventilation naturelle. Ce phénomène avait été compris avant d'être théorisé, comme le montre l'étude de la porosité des façades (voir Figure 1- 16).

On constate une nette tendance à l'augmentation de la porosité à mesure que l'on se rapproche de l'équateur. Dans peu de cas, la porosité descend sous les 20% (30% des cas étudiés dans les latitudes entre 15° et 30° en valeur absolue et va jusqu'à plus de 35% dans la zone équatoriale.

On constate aussi (visuellement) que cette porosité est globalement répartie de manière homogène sur les façades, cela peut être un effet de style (rythme et composition des façades typique du néoclassicisme très représenté dans nos échantillons) et une proportion verticale marquée des ouvrants. Ceci permet une homogénéité des écoulements internes, par opposition à la composition géométrique et non symétrique des façades issues de l'architecture moderne avec ses bandeaux à appuis de fenêtre hauts, limitant l'écoulement du flux sur le corps.

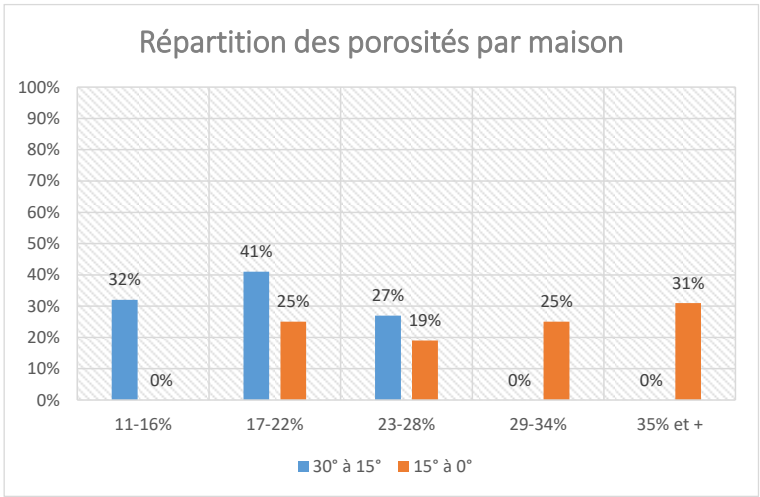


Figure 1- 16: Variation de la porosité des façades selon la latitude (à droite) - illustration d'une maison à Ouidah à forte porosité (à gauche) – © Rives Coloniales

4.5 Ouvertures et protection solaire

Dans la conception de l'enveloppe, les ouvertures et leurs éventuelles protections constituent souvent un point faible en particulier si celles-ci sont vitrées. Ceci a été compris très tôt dans les colonies, dès le XVIIème siècle comme le cite Charlery dans Maisons de maitres et habitations coloniales :

« Comme le précise le père du Tertre, " je n'ai vu des vitres qu'aux fenêtres des maisons des gouverneurs, tous les particuliers n'en ont point, soit parce que le verre est trop fragile, soit que l'usage n'en est pas pratique :vu les chaleurs du pays, on est obligé de tenir toujours la porte et les fenêtres ouvertes pour laisser passer la brise, afin de rafraîchir la case, mais on ferme la nuit à cause de la trop grande fraîcheur " »(Charlery, 2004).

Ces enseignements de l'histoire n'ont que peu porté de fruits puisque l'on n'a eu de cesse de vitrer les ouvertures, malgré « l'invention » très tôt d'un dispositif particulièrement adapté : les jalousies et les persiennes : « Il faut ainsi attendre les années 1760 pour en voir les premières mentions dans les traités d'architecture ou de menuiserie. Le douzième tome de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, édité en 1765, en donne la première définition : " *Jalousies ou châssis de bois qui s'ouvrent en dehors comme contrevents* (voir Figure 1- 17), *et sur lesquels sont assemblés à égale distance des tringles de bois en abat-jour qui font le même effet que les stores, rompent la lumière et donnent entrée à l'air dans un appartement ".*

Les volets persiennés (voir Figure 1- 18) remplissent ainsi ces fonctions de protection des ouvertures contre le soleil, de rendre possible la ventilation diurne et nocturne, de sécurisation et de protection à la pluie, ce qui en fait un élément important du vocabulaire de l'architecture tropicale.

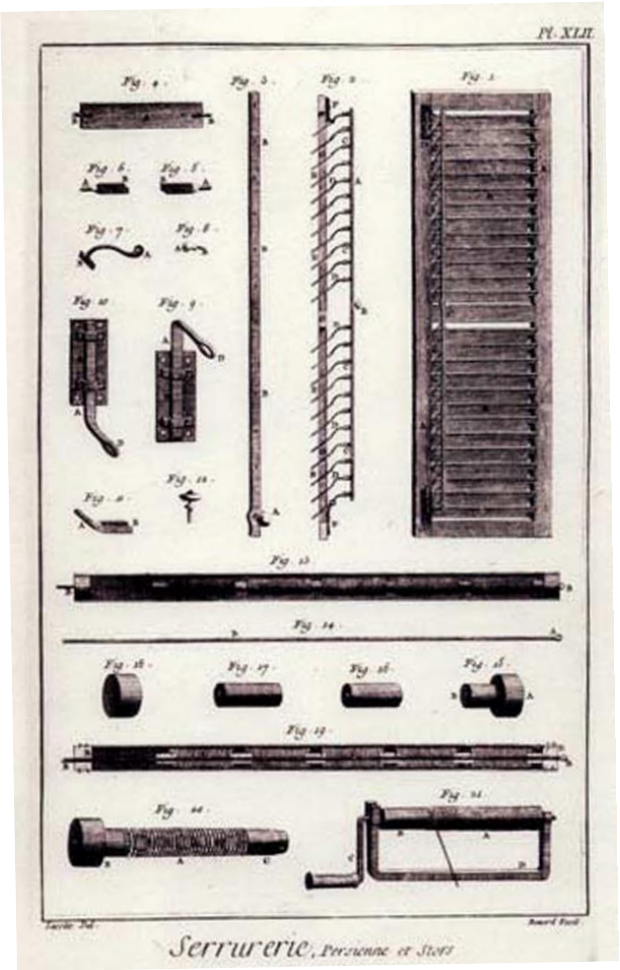


Figure 1- 17: Extrait d'une planche sur la fabrication des persiennes. Diderot et d'Alembert. L'Encyclopédie, tome 2, 1765. Repro. Charlery © Charlery, 2003

Figure 1- 18: Volets persiennés et varangue – maison Calédonienne – © auteur

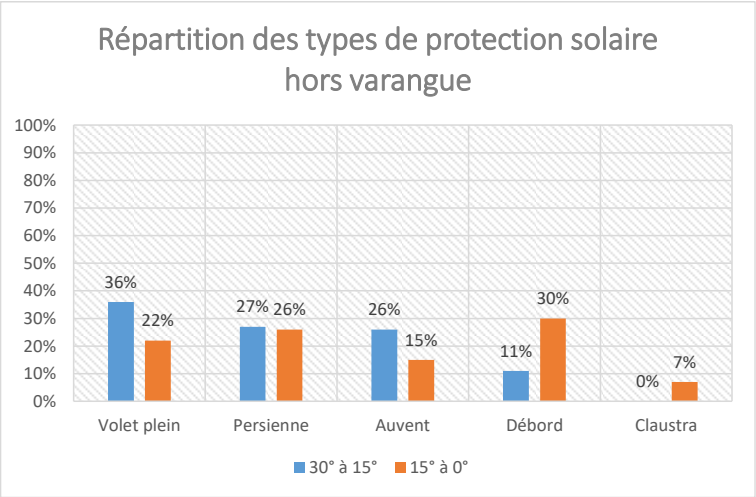


Figure 1- 19: Répartition des types de protection solaires selon la latitude (à droite) - illustration protection solaire par persiennes à Queenstown – Australie – (© auteur) (à gauche)

L'observation de la Figure 1- 19 permet d'avancer les hypothèses suivantes :

La plus forte présence des volets pleins aux latitudes proches des tropiques permet une meilleure protection des vents cycloniques dans une zone ou la ventilation nocturne est moins indispensable (35% dans la zone tropicale pour Un peu plus de 20% plus proche de l'équateur).

Pour les mêmes raisons, le débord de toiture semble privilégié à proximité de l'équateur (environ 30% des cas) et moins fréquent (environ 10% des cas) dans la zone tropicale. Ceci et peut être dû au risque d'arrachement de la toiture, à proximité des tropiques, sujets aux cyclones. On y préfère les auvents (environ 25% des cas) dont l'arrachement ne met pas la structure en péril, alors qu'ils représentent un peu plus de 10% des cas à l'équateur.

4.6 Constitution des varangues

Définition : La varangue est l'appellation Réunionnaise de la galerie ouverte, ou de la véranda. (Voir Figure 1- 20).

Figure 1- 20: « © maisons traditionnelles calédoniennes » illustrant les différentes sortes de varangues (à gauche) - Maison Orré Saint Pierre (à droite) avec sa varangue « sous pente » – (© H Douris)

Dans les Caraïbes : « Il est difficile de retracer l'apparition et le développement de la galerie ouverte dans l'aire caribéenne. Cependant, il semble que ce soit dans les colonies espagnoles, et plus précisément à Santo Domingo, que les premières galeries ont été construites, dès l'installation des premiers colons à la fin du XVe siècle. »(Charlery, 2004).

En Afrique : « La maison à véranda apparaît à la fin du XIX" siècle comme une réponse à diverses préoccupations dans les colonies. En premier lieu, elle répond dans son organisation aux exigences des climats tropicaux. En outre, elle est en conformité avec les réglementations hygiénistes. Enfin, elle est facile à mettre en œuvre. Plus globalement, elle permet d'imprimer un style particulier à l'habitation coloniale et a valeur de modèle. Elle se distingue d'une part de l'habitat métropolitain d'autre part de l'habitat vernaculaire. »(Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993).

Figure 1- 21: Maison à Conakry – Guinée – © Rives Coloniales

« Les ingénieurs qui conçoivent ce modèle ne se réfèrent pas particulièrement au contexte africain. Pour résoudre la question de « l'habitat tropical aux colonies », ils cherchent des solutions dans ce qui a été déjà produit dans d'autres colonies, espagnoles en Amérique latine, anglaises en Asie. La présence de vérandas tout autour des corps d'habitation dans ces pays leur semble une solution adéquate. » (Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993) (voir Figure 1-21).

Sur l'île de La Réunion l'apparition des premières varangues au XVIIIème siècle est citée par Bernard Leveneur : « les premières varangues réunionnaises datent du XVIIIème siècle. L'une des plus anciennes est celle de la cure de Saint Denis, maison terminée en 1740 ».(Leveneur, 2007).

Il n'est pas étonnant que la varangue soit omniprésente en milieu tropical on peut même dire que c'est la pièce commune de cette partie du globe. On constate qu'elle ne trouve pas son origine en Afrique, mais sur les autres continents. Par contre elle est présente sous différentes formes : galerie, sous pente, sur un, deux, trois ou quatre côtés. Elle a été adpotée de manière généralisée et peut être considérée comme l'archétype fondamental, représentatif et essentiel de la zone tropicale. Elle transcrit d'ailleurs souvent une certaine forme d'art de vivre, avec l'image d'épinal du hamac sous la varangue. C'est cette variabilité de forme que nous allons tenter de caractériser.

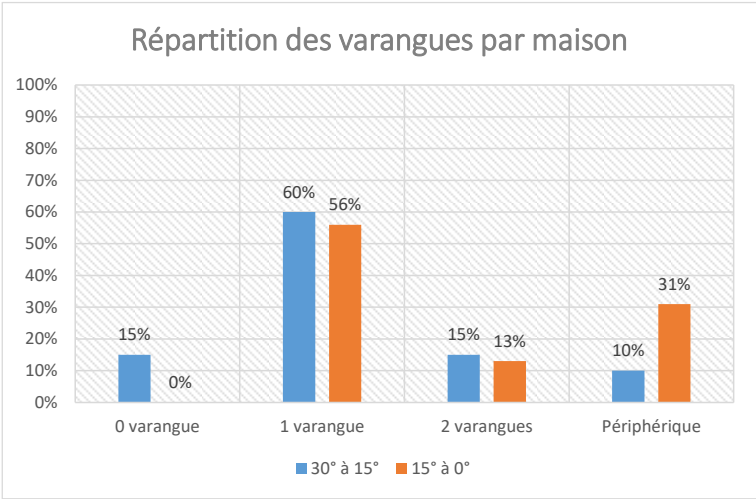


Figure 1- 22: Répartition du nombre de varangues selon la latitude (à gauche) – Illustration maison à varangue périphérique (© Island Homes Eichler de Saint Georges) (à droite)

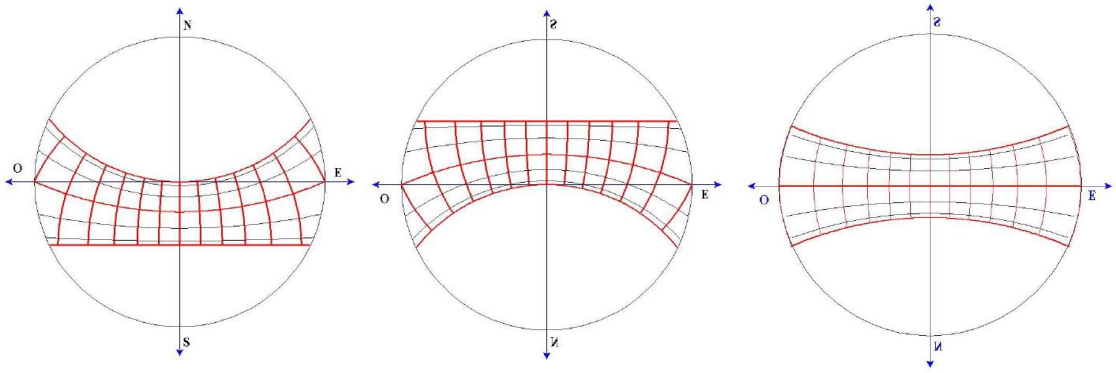


Figure 1- 23: Diagramme solaire Tropique du Cancer (gauche), équateur (centre) et Tropique du Capricorne (droite). Illustration du besoin de protection au Nord ou au Sud pour les Tropiques, au Nord et au Sud pour l'équateur.

On remarque (voir Figure 1- 22) que plus on se rapproche de l'équateur plus le nombre de varangues augmente.

Ceci s'explique par l'observation de la course du soleil et sa variabilité en fonction de la latitude. Plus on se rapproche de l'équateur, plus les 4 façades sont exposées successivement tout au long de la journée et de l'année (voir Figure 1- 23). La multiplication des varangues permet d'optimiser les protections solaires de toutes les façades sous les basses latitudes et donc d'améliorer le confort thermique de la maison.

On note donc une adaptation du nombre de varangues en fonction de la latitude. Ceci conforte le rôle climatique essentiel de cet élément d'architecture, au delà de son rôle fonctionnel et explique sa quasi omniprésence dans la zone intertropicale. Elle en est bien un des marqueurs archétypal.

4.7 Quatre études de cas

Afin d'illustrer notre propos, nous allons présenter en détail 4 cas d'études, par type de climat tropical humide : Af, Am et Aw, selon la classification de Köppen et vernaculaire ou colonial et les analyser sous l'angle de la réponse à l'adaptation à la ventilation naturelle:

- Cas 1 en climat tropical Aw vernaculaire : maison 123 Mahakan à Bangkok © VERNADOC (Tableau 1- 2);
- Cas 2 maison en climat tropical Aw et coloniale : maison Orré Réunion ©DAC OI (Tableau 1- 3);
- Cas 3 maison en climat tropical Af et vernaculaire : maison Endak Endah traditionnelle malaisienne (Sahabuddin and Firrdhaus, 2015) (Tableau 1- 4);
- Cas 4 maison en climat tropical Am et coloniale : maison Saint Jorre au Seychelles © Bossud-Picat Island Homes (Tableau 1- 5).

Nous allons donc comparer les contextes géographiques et climatiques et les réponses architecturales (voir Tableau 1- 2, Tableau 1- 3, Tableau 1- 4, Tableau 1- 5).

Cas 1 : L'orientation aux vents dominants de la maison 123 optimise le potentiel de ventilation, en effet la façade Nord est la plus poreuse (39%) et est sous le vent, ce qui améliore les performances thermiques. La porosité moyenne de 26% est forte sans doute compte tenu de la densité bâtie et du contexte climatique. La maison est posée sur de courts pilotis ce qui l'éloigne de l'humidité du sol, Bangkok est une ville située au bord d'un fleuve et soumise à des inondations.
Cas 2 :La maison Orré présente un différentiel de porosité moyenne entre le rez de chaussée (22%) et l'étage (15%) qui peut s'expliquer par un potentiel plus élevé en étage. Bien que l'orientation ait été dictée par l'urbanisme (façade principale face à la rue), la plus forte porosité à l'Ouest (24% rdc – 18,5% étage) pour (18% rdc – 14% étage) optimise le potentiel de ventilation. Le sous bassement est ici modeste le régime de précipitations étant mon contraignant et la maison située dans une ville en forte pente, supprimant le risque d'innondation.
Cas 3 : La maison malaisienne présente une très forte porosité (32% en moyenne) permettant de s'adapter aux vents globalement faibles. La surélévation sur pilotis conforte ce potentiel . Elle permet aussi de mieux gérer la forte humidité du sol liée au régime de précipitations.
Cas 4 : La maison Saint Jorre orientée face à la mer présente une organisaiton favorisant la ventilation traversante renforcée par une forte porosité de 32%. Elle optimise ainsi son potentiel dans un climat contraigant. Comme pour la maison Orré, on note que l'orientation tient plus de la démonstation d'un statut social et d'une mise en scène que par rapport au climat, même si dans ce cas le il y a une certaine convergence avec l'orientation aux vents dominats.
Elle présente une surélévation par rapport au sol avec un sousbassement en pierre qui permet de gérer, comme pour la maison malaisienne la forte humidité du sol liée aux précipitations.

Les quatres maisons proposent des formes architecturales avec des toitures en pente forte, offrant une meilleure étanchéité aux fortes pluies.
Les matériaux de toiture et de façades sont tous à faible inertie, tôle et bois, sauf pour la maison vernaculaire malaisienne qui utilise des matériaux du site (fibre végétale) pour la toiture, la tôle n'étant pas disponible alors.

Tableau 1- 2: Présentation d'une maison vernaculaire thaïlandaise

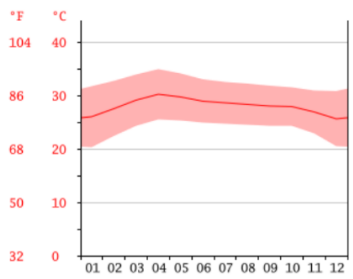
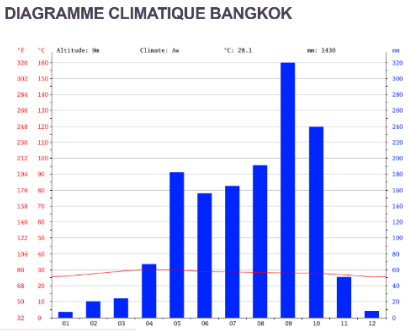
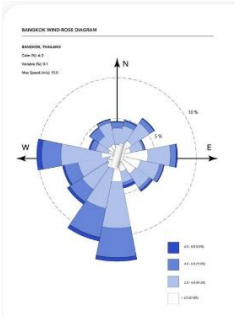
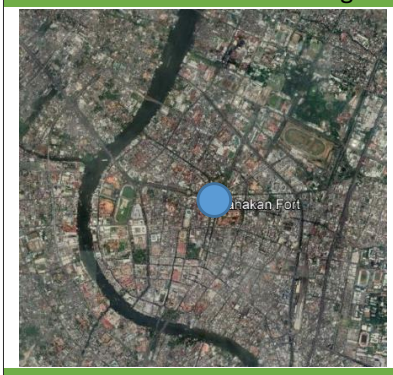
Maison 123 Mahakan	Bangkok Thailande	13,75° latitude Nord
Contexte climat température	contexte précipitations	contexte climat vent
		
Plan de situation contexte large	Plan situation environnement proche	plan de masse
		
Plan de rez de chaussée	plan étage	coupe
façade nord	façade ouest	façade est

Tableau 1- 3: Présentation d'une maison coloniale réunionnaise

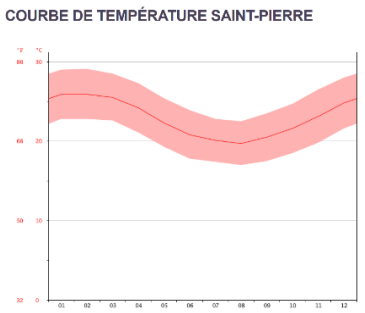
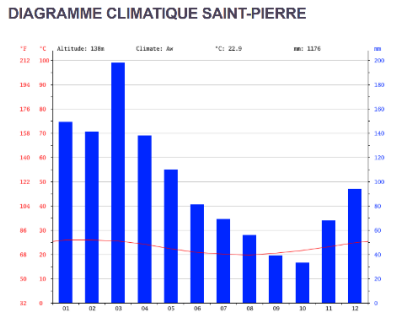
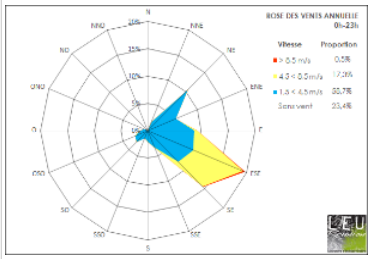
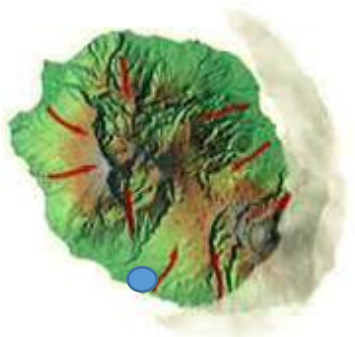
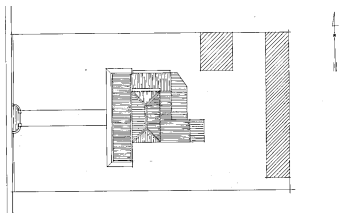
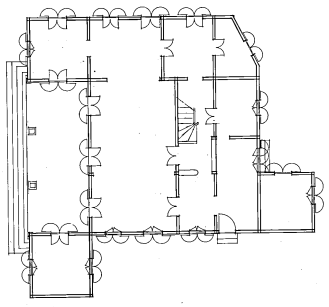
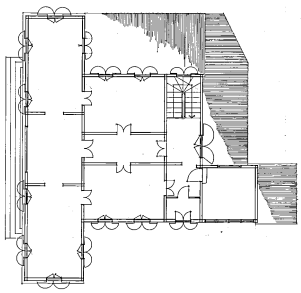
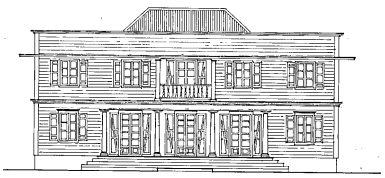
Contexte climat température	contexte climat précipitations	contexte climat vent
		
Plan de situation contexte large	**Plan situation environnement proche**	**plan de masse**
		
Plan de rez de chaussée	**plan étage**	**coupe**
		
façade Ouest	**façade Est**	**façade Sud**
		

Tableau 1- 4: Présentation d'une maison vernaculaire malaisienne

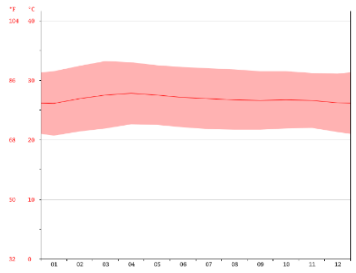
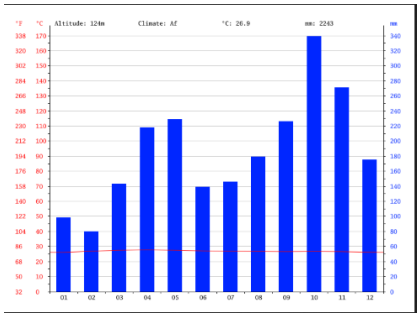
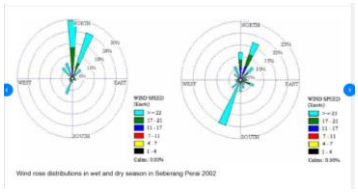
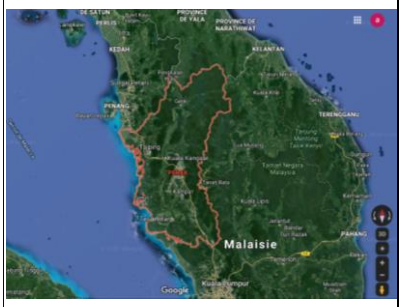
Maison Andak Endah	Perak - Malaisie	4,4° latitude Nord
Contexte climat température	contexte précipitations	contexte climat vent
		
Plan de situation contexte large	Plan situation environnement proche	plan de masse
		
Plan de rez de chaussée	plan étage	coupe
façade principale	façade arrière	façade 1

Tableau 1- 5: Présentation d'une maison coloniale seychelloise

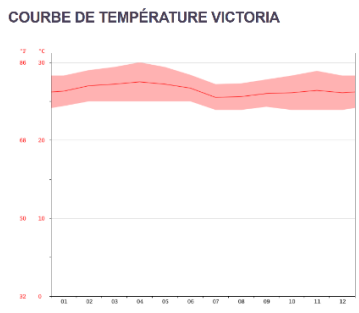
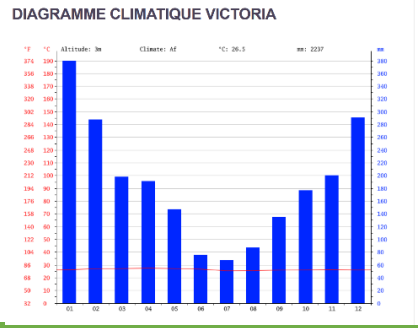
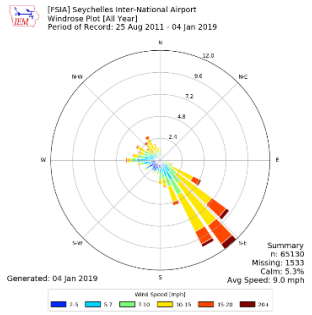
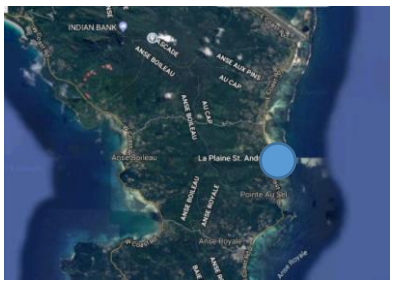
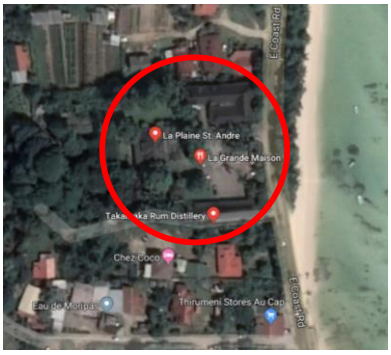
Maison Saint Jorre -	Plaine Saint André - Seychelles	4,6° latitude Sud
Contexte climat température	contexte précipitations	contexte climat vent
		
Plan de situation contexte large	Plan situation environnement proche	plan de masse
		
Plan de rez de chaussée	plan étage	coupe
façade principale	façade arrière	façade 1

Tableau 1- 6 : Tableau comparatif de maisons vernaculaires et coloniales

Maison	123 Mahakan	Orré	Andak Enah	Saint Jorre
Type	vernaculaire	coloniale	vernaculaire	coloniale
	Thailande	La Réunion	Malaisie	Les Seychelles
Contexte				
Contexte climatique tropical humide	Aw	Aw	Af	Am
Contexte Géographique	urbain dense	urbain lâche	rural	rural
Environnement proche	construit	planté	planté	planté
Forme architecturale				
Pilotis	non	non	oui	non
Toiture				
Forme toiture principale	4 pans	4 pans + 1 pan	2 pans + 2 pans	4 pans + Lucarnes
Pente principale	42°	45°	60°	45°
Débord de toiture	oui	non	oui	oui
Protections solaires	non	oui	non	non
Varangue	1 au Nord	1 à L'Ouest	2 côtés	1
Matériaux				
Matériau toiture	tôle	zinc	fibre végétale	tôle
Matériau parois	bardage bois	bardage bois	bois et fibre	bardage bois
Porosité				
Porosité moyenne	26%	18,70%	32%	32%
Porosité Rdc		22%		
Porosité étage		15,50%		
Porosité sens traversant	30%	21,5% (rdc)	36%	32%

Le Tableau 1- 6 comparatif de maisons vernaculaires et coloniales montre que le choix des matériaux, comme la porosité ont des caractéristiques proches. Ces exemples d'architecture coloniale ne présentent pas de distinction claire des exemples d'architecture vernaculaire, soit ils s'en sont inspirés, soit des contextes identiques amènent des solutions comparables.

La forte porosité, supérieure à 20%, montre dans tous les cas l'importance du potentiel de ventilation généré par celle-ci. L'orientation par rapport aux vents ne semble pas toujours être un critère, soit pour des raisons sociales (maison réunionnaise, orientation face à la rue), topographique (maison seychelloise, orientation face à la mer), de contrainte urbaine (maison thailandaise, orientation imposée par le parcellaire réduit) ou manque d'information (maison indonésienne). Elle semble pouvoir être optimisée par un différentiel de porosité entre façdes avec une façade sous le vent plus poreuse. Il reste hasardeux d'affirmer que ce soit lié à un choix de ventilaiton plus qu'à une raison sociale ou urbaine.

La porosité se présente donc ici comme un **marqueur important** de l'adapation à la ventilation naturelle .

5 Conclusion

Les éléments étudiés précédemment nous permettent de relever des tendances et tenter quelques explications :

Il apparait certains liens entre la latitude (Nord ou Sud) et certains choix architecturaux opérés :

Sur les aspects liés à la ventilation naturelle

- La porosité augmente à mesure que l'on se rapproche de l'équateur, **ce qui confirme l'adaptation à des températures plus élevées par une optimisation du potentiel de ventilation naturelle des maisons**. Il reste à déterminer si celui-ci se concrétise à la lumière d'étude plus poussées de vitesses de l'air à l'intérieur de ces maisons en les corrélant à un potentiel de vent sur les sites d'implantation ;
- L'orientation par rapport aux vents dominants n'apparait pas clairement comme un critère d'adaptation au potentiel maximal de ventilation soit pour des raisons contextuelles ou des raisons sociales.

Sur les aspects liés à la protection solaire :

- La plus faible fréquence des débords de toiture et corollairement l'augmentation de l'auvent sous les Tropiques et inversement à l'équateur ;
- L'omniprésence de la varangue. Même si elle n'était pas présente systématiquement dans les archétypes importés dans les premiers temps des colonies, elle a quasiment fait son apparition systématiquement en tout point de la zone intertropicale.

Sur les aspects liés à la forme architecturale :

- Le nombre de pans de toiture ainsi que leur pente croit vers les Tropiques, sans doute sous l'influence des régimes cycloniques (diminution de la dépression en toiture) ;
- Les variantes observées portent sur la présence de cet élément sur une, deux ou quatre façades. Pour ce point on peut noter une tendance à multiplier les varangues à mesure que l'on approche de l'équateur pour une évidente optimisation de la protection solaire. On peut qualifier cet archétype comme typique et marqueur d'une architecture tropicale. Nous verrons d'ailleurs dans la partie 3 comment nous avons pu réinterpréter cet espace essentiel de la vie sous les tropiques.

Sur les aspects liés aux matériaux :

- L'inertie des matériaux de façade décroit vers les basses latitudes, l'influence du climat semble ici déterminante .

Si l'on compare les exemples décrits précédemment avec la production architecturale du mouvement moderne qui s'est répandue à la fin de la période coloniale (Voir Figure 1- 24: Maison au Costa Rica - (© B Stagno (à gauche)- Pedregulho 1946– Alphonso Edouard Reidy architecte – (à droite) © Latin America in construction: architecture 1955-1980. Illustration de la disparition des matériaux et solutions traditionnels (bois, varangues, toiture…) au profit de matériaux et solutions modernes non adaptées au climat tropical), on peut noter, la disparition quasi systématique de tous ces éléments étudiés : parois en pierre ou bois, toiture à pente, auvent, varangue, fenêtres verticales et ce sur l'autel des canons stylistiques de l'architecture

moderne, du béton et du verre triomphant. Ceci est corroboré par les cinq points de l'architecture moderne selon Le Corbusier (Schmidt, 2011): « toit-terrasse, pilotis qui libèrent le sol pour la circulation et la végétation, fenêtres en longueur ou en bandeau , façade rideau ». Seules quelques protections solaires, souvent mal dimensionnées, ont subsisté et essentiellement dans les programmes de logement où, bien souvent, la climatisation était absente.

Figure 1- 24: Maison au Costa Rica - (© B Stagno (à gauche)- Pedregulho 1946– Alphonso Edouard Reidy architecte – (à droite) © Latin America in construction: architecture 1955-1980. Illustration de la disparition des matériaux et solutions traditionnels (bois, varangues, toiture…) au profit de matériaux et solutions modernes non adaptées au climat tropical

En tout état de cause il semble important de rappeler que le climat, la localisation géographique et le potentiel de ventilation naturelle aient bien influencé, pour les aspects : choix des matériaux des parois, forme de la toiture, porosité, type de protection solaire et répartition des varangues, la conception architecturale des cas étudiés. Ceci parait moins évident pour le choix des matériaux de la toiture dans la mesure où nous n'avons pas pu mettre en évidence de tendance claire pour ce point.

Tableau 1- 7: Tableau récapitulatif des caractéristiques moyennes des maisons étudiées

	latitude 0°à15° (valeur absolue)	latitude 15°à30° (valeur absolue)
Choix des matériaux	19% maçonnerie	34% maçonnerie
	72% bois	58% bois
Forme de la toiture	56% 2 pans	20% 2 pans
	44% 4 pans et plus	80% 4 pans et plus
Porosité	25% de 11% à 23%	73% de 11% à 23%
	75% de 23% et plus	27% de 23% et plus
Protection solaire	30% débord de toiture	11% débord de toiture
	15% auvent	265% auvent
Répartition des varangues	69% de 0 à 2 varangues	90% de 0 à 2 varangues
	31% varangue périphérique	10% varangue périphérique

Le tableau ci-dessous synthétise les éléments significatifs de ce chapitre (voir Tableau 1- 7) :

Concernant la comparaison des solutions architecturales entre maisons de pays colonisés et ceux non colonisés par l'Occident, le faible nombre d'exemple des dernières (4), ne nous a pas permis de conclure valablement sur des tendances.

Par la suite, l'apparition du mouvement moderne et des techniques nouvelles (la climatisation) ont permis l'apparition d'architectures à l'expression liée plus à un style donné, qu'à une adaptation à un environnement dont elle pouvait s'extraire en récréant un climat intérieur confortable. (Voir Figure 1- 25 Evolution schématique de l'habitat tropical (© auteur) de la reproduction du modèle métropolitain (maison en maçonnerie) à gauche, à l'architecture tropicale bioclimatique à droite en passant par l'usage du bois, l'ajout de varangues, le pastiche en béton et la maison et l'immeuble « modernes » (de gauche à droite).

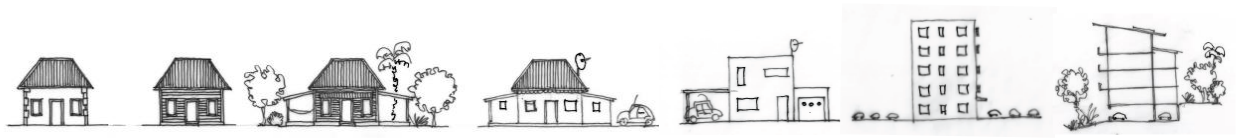


Figure 1- 25 Evolution schématique de l'habitat tropical (© auteur) de la reproduction du modèle métropolitain (maison en maçonnerie) à gauche, à l'architecture tropicale bioclimatique à droite en passant par l'usage du bois, l'ajout de varangues, le pastiche en béton et la maison et l'immeuble « modernes » (de gauche à droite).

Nous avons pu mettre en évidence, au travers de ce chapitre, que l'architecture tropicale prémoderne, vernaculaire, coloniale, repose sur des principes de conception liés, pour partie, à une adaptation aux spécificités du climat que l'on peut qualifier d'aérothermiques. Un certain nombre d'études ont par ailleurs démontré le confort de celles-ci (Weber and Yannas, 2014),(Ratnweera, 1996),(GhaffarianHoseini et al., 2014),(Toe and Kubota, 2015),(Plemenka, 1994),(Dupont et al., 1994).

Toutefois, aucune ne s'est intéressé à l'évaluation du confort de l'architecture traditionnelle réunionnaise créole. L'objet du prochain chapitre sera d'étudier les performances d'une de celles-ci, la maison Levieux, citée précédemment dans notre panel, afin de voir si elle apportait déjà des garanties de confort aux usagers.

6 Bibliographie

(Angen, 2013)	Angen, C., 2013. Concept and Technique: How Traditional Japanese Architecture can contribute to Contemporary Sustainable Design Practices 118.
(Anh-Tuan et al., 2011)	Anh-Tuan, N., Quoc-Bao, T., Duc-Quang, T., Sigrid, R., 2011. An investigation on climate responsive design strategies of vernacular housing in Vietnam - ScienceDirect URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311001211?np=y.
(Ayoub, 1960)	*Ayoub, R., 1960. contrôle thermique des locaux dans les tropiques et les régions tempérées ensoleillées. Tech. Archit. 80.*
(Bay, 2001)	Bay, J.-H., 2001. Cognitive biases in design: the case of tropical architecture. Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde, Delft.
(Bergdoll et al., 2015)	Bergdoll, B., Comas, C.E., Liernur, J.F., Del Real, P., Museum of Modern Art (New York, N.Y.) (Eds.), 2015. Latin America in construction: architecture 1955-1980. Museum of Modern Art, New York.
(Bertil et al., 1997)	*Bertil, P., Bègue, C., Géraud, J.F., 1997. Grands Domaines, Région Réunion. ed.*
(Borong et al., 2004)	Borong, L., Gang, T., Peng, W., Ling, S., Yingxin, Z., Guangkui, Z., 2004. Study on the thermal performance of the Chinese traditional vernacular dwellings in Summer. Energy Build. 36, 73–79. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00090-2
(Charlery, 2004)	Charlery, C., 2004. Christophe Charlery, « Maisons de maître et habitations coloniales dans les anciens territoires français de l'Amérique tropicale », In Situ [En ligne], 5 | 2004. Situ Rev. Patrim. https://doi.org/10.4000/insitu.2362
(Denise, 2004)	Dessolier, H., 1882. De l'habitation dans les pays chaud : contribution à l'art de l'acclimatation, Alger. ed.
(Dessolier, 1882)	Dupont, M., Celestine, C., Feuillard, T., 1994. Natural ventilation in a traditional house on a West Indies Island (Guadeloupe):: Field testing on site and in a wind tunnel. Renew. Energy 4, 275–281.
(Dupont et al., 1994).	Dupont, M., Celestine, C., Feuillard, T., 1994. Natural ventilation in a traditional house on a West Indies Island (Guadeloupe):: Field testing on site and in a wind tunnel. Renew. Energy 4, 275–281.
(Etave, 1983)	Etave, C., 1983. Etude typologique des conditions d'adaptation au climat des constructions à l'ile de la Réunion.
(F Picgirard - J Gandemer, 2012)	*F Picgirard - J Gandemer, 2012. La ventilation naturelle en pratique. Guide pratique ADEME.*
(Frey, 2010)	*Frey, P., 2010. Learning from vernacular: [towards a new vernacular architecture]. Actes Sud, Arles.*
(Fry and Drew, 1974)	*Fry, M., Drew, J., 1974. Tropical architecture in the dry and humid zones. R. E. Krieger Pub. Co, Huntington, N.Y.*
(Ghafar, 2014)	Ghafar, A., 2014. Malay vernacular architecture [WWW Document]. malayvernacular.html. URL http://www.hbp.usm.my/conservation/malayvernacular.htm.
(Ghaffarian Hoseini et al., 2014)	Ghaffarian Hoseini, AmirHosein, Berardi, U., Dahlan, N.D., GhaffarianHoseini, Ali, 2014. What can we learn from Malay

	vernacular houses? Sustain. Cities Soc. 13, 157–170. https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.008
Guaita, 1999)	*Guaita, O., 1999. La maison coloniale. Hazan, S.l.*
(Guilloux Tristan, 1997)	Guilloux Tristan, 1997. architectures coloniales à Brazzaville.
(Hobson, 2007)	Hobson, D.L., 2007. The domestic architecture of the earliest british colonies in the american tropics: Georgia institute of Technology.
(Ismail, 2012)	Ismail, W.H.W., 2012. Cultural Determinants in the Design of Bugis Houses. Procedia - Soc. Behav. Sci. 50, 771–780. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.08.079
(James-Chakraborty, 2014)	James-Chakraborty, K., 2014. Beyond postcolonialism: New directions for the history of nonwestern architecture. Front. Archit. Res. 3, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.foar.2013.10.001
(Lamunière, 1988)	Lamunière, J.-M., 1988. Le classement typologique en architecture. https://doi.org/10.5169/seals-128866
(Leveneur, 2007)	Leveneur, B., 2007. Petites histoires de l'architecture réunionnaise: de la Compagnie des Indes aux années 1960. 4 épices éditions, Sainte-Clotilde, Réunion.
(LPBS and IMAGEEN, 2009)	LPBS, IMAGEEN, 2009. Rapport PERENE version 26 octobre 2009.pdf. REGION REUNION.
(Marino, 2014)	Marino, G., 2014. « Some Like It Hot ! », Le confort physiologique et ses dispositifs dans l'architecture du XXe siècle 651.
(McGillick and Kawana, 2014)	*Sustainable luxury: the new Singapore House, solutions for a livable future. Tuttle Publishing, Tokyo.*
(Mohd Sabrizaa, 2014)	Mohd Sabrizaa, A.R., 2014. Understanding the Past for a Sustainable Future : Cultural mapping of Malay heritage Mohd Sabrizaa Abd Rashid*. ELSVIER, Social and Behavioral Science.
(Moutsopoulos,1993)	*Moutsopoulos, N., 1993. L'architecture Vernaculaire.*
(Olgyay et al, 2015)	*Olgyay, V., Olgyay, A., Lyndon, D., Olgyay, V.W., Reynolds, J., Yeang, K., 2015. Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism, New and expanded edition. ed. Princeton University Press, Princeton.*
(Plemenka, 1994)	Plemenka, S., 1994. l'aspect bioclimatique de l'habitat vernaculaire [WWW Document]. URL https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=l%27aspect+bioclimatique+de+l%27habitat+vernaculaire&btnG=.
(Prouvé, 2009)	Jean Prouvé: la maison tropicale = Jean Prouvé: the tropical house. Centre Pompidou, Paris
(Rapoport,, 1991)	Rapoport, A., 1991. House form and culture. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
(Ratnweera, 1996)	Ratnweera, C., 1996. Enhanced cooling in typical Sri Lankan dwellings.pdf.
(Rivière Noyre, 1980)	Rivière Noyre, J., 1980. L'habitat Réunionnais.
(Sahabuddin and Firrdhaus, 2015)	Sahabuddin, M., Firrdhaus, M., 2015. Case studie analysis : traditionnel Malay House and People's housing project (PHP). Int. J. Archit. Res. 9(2), 31–44.
(Schmidt, 2011)	Schmidt, 2011. Le_Corbusier.pdf.
(Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993).	*Soulillou, J., Doutreuwe Salvaing, F. (Eds.), 1993. Rives coloniales: architectures, de Saint-Louis à Douala, 1. ed. ed, Collection Architectures traditionnelles. Editions Parenthèses ; Editions de l'Orstom, Marseille : Paris.*

(Stevens, 2015)	Stevens, A., 2015. André Stevens – Architecture de terre et Patrimoine mondial . Missions en Terres d'argile [WWW Document]. URL http://www.koregos.org/fr/andre-stevens-architecture-de-terre-et-patrimoine-mondial/8422/.
(Tareb, 2006)	Tareb, 2006. Ventilation-naturelle-analyse-solutions.pdf [WWW Document]. Habiter Autrem. Org. URL https://www.habiter-autrement.org/12.energies/contributions-12/Ventilation-naturelle-analyse-solutions.pdf.
(Technique et architecture n°2 février 1960)	*Technique et architecture n°2 février 1960.*
("Thematic Expert Meeting on Wooden Urban Heritage in the Caribbean Region," 2003)	Thematic Expert Meeting on Wooden Urban Heritage in the Caribbean Region, 2003. . Presented at the Caribbean wooden treasures, UNESCO Worl Heritage center, Georgetown.
(Toe and Kubota, 2015)	Toe, D.H.C., Kubota, T., 2015. Comparative assessment of vernacular passive cooling techniques for improving indoor thermal comfort of modern terraced houses in hot–humid climate of Malaysia. Sol. Energy 114, 229–258. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.035
("Tropical Buildings,")	Tropical Buildings [WWW Document], n.d. URL http://www.tropicalbuildings.org/about.
(Weber and Yannas, 2014)	*Weber, W., Yannas, S. (Eds.), 2014. Lessons from vernacular architecture, earthscan. ed. Routledge, London ; New York.*
(Weiss, 1996)	*Weiss, J.E., 1996. La arquitectura colonial cubana: siglos XVI al XIX. Instituto Cubano del Libro ; Agencia Española de Cooperación Internacional ; Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucia, La Habana : [Madrid] : Sevilla.*

Chapitre 2

Analyse et évaluation des performances thermiques d'une maison traditionnelle à La Réunion

Une case réunionnaise type, fictive © Connaissance de l'architecture réunionnaise – Egon JP

Nous allons dans ce chapitre caractériser le confort et par quels dispositifs (architecturaux et techniques) il est obtenu pour une « case » traditionnelle Réunionnaise.

Table des matières

1 Introduction 83
2 Revue de littérature 84
2.1 Méthodes d'évaluation bioclimatique 84
2.2 Analyse typologique de l'architecture réunionnaise 85
2.3 Sélection d'une maison représentative 85
3 Méthodologie 86
3.1 Description du cas d'étude 86
3.2 Descriptif expérimental 95
3.3 Sorties étudiées 100
4 Résultats et discussion 101
4.1 Analyse des données climatiques extérieures 101
4.2 Analyse des températures d'air et des humidités relatives entre pièces 107
4.3 Analyse des diagrammes de Givoni dans les pièces intérieures 112
4.4 Etude par caméra thermique 115
5 Conclusion 121
6 Bibliographie 122

1 Introduction

Le chapitre 1 nous a montré, à travers l'analyse de maisons prémodernes, vernaculaires ou coloniales, comment ces architectures reposent sur des principes de conception liés, pour partie, à une adaptation aux spécificités du climat : Choix des matériaux, pente et forme de la toiture, porosité des parois, présence de varangues. Toutefois, ces éléments n'apportent pas directement d'éléments de réponse sur le confort issu de ces archétypes.

Nous proposons dans ce chapitre d'étudier les performances thermiques d'une case traditionnelle réunionnaise, dont nous évaluerons la représentativité en tant qu'archétype local. En effet, au-delà des poncifs tels que « c'était mieux avant, les cases traditionnelles sont plus confortables que les maisons actuelles… ». Aucune étude, n'a été recensée à ce jour dans la littérature, ayant proposé d'évaluer et d'analyser le potentiel de confort d'une maison traditionnelle Réunionnaise.

2 Revue de littérature

2.1 Méthodes d'évaluation bioclimatique

La caractérisation des performances thermique d'une maison traditionnelle n'est bien sûr pas nouvelle à l'échelle internationale. Selon Richard Hyde*: « There has been considerable research on the bioclimatic performance of vernacular houses and houses designed using Modernist principles » « Il y a eu des recherches nombreuses sur les performances bioclimatiques des maisons vernaculaires et de maisons conçues avec des principes modernistes »* (Richard Hyde).

Cette approche quantitative se situe dans la lignée de Victor Olgyay cité par Bay (Bay, 2001) « une des premières approches quantitative pour déterminer le confort thermique a été proposée par Victor Olgyay (1952, 13-23) dans son article : approche bioclimatique de l'architecture présentée dans l BRAB en 1952. Cette approche prenant en compte les paramètres du confort et plus particulièrement du confort adaptatif a fait l'objet d'une revue de littérature (Dear et al., 2013). Une démarche quantitative est aussi décrite pour l'étude de la maison de Luis Barragan (Hyde et al., 2016) basée sur la technique de POE (Post Evaluation Occupancy).

En termes de références bibliographique sur l'étude de performances de maisons traditionnelles, on peut encore citer le travail de Toe et Kubota qui ont comparé entre elles deux maisons traditionnelles Malaisiennes avec deux maisons contemporaines. Les principaux objectifs de cette étude étaient d'étudier les techniques vernaculaires de refroidissement passif et leur application potentielle pour améliorer le confort thermique intérieur des maisons terrasses modernes en briques à ventilation naturelle en Malaisie.(Toe and Kubota, 2015). Chandel et al ont mené une étude concernant les architectures vernaculaires efficientes énergétiquement à des fins de transposition dans l'architecture contemporaine (Chandel et al., 2016). Elles ont montré comment améliorer le confort intérieur sous différents climats (l'usage de matériaux tels que la terre, de systèmes passifs, ou encore, entre autres, en climat tropical humide l'utilisation de la ventilation naturelle). Enfin l'architecture vernaculaire à Maputo est décrite dans (Beccali et al., 2018) par une étude thermo-hygrométrique dans des bâtiments en ventilation naturelle. L'article passe en revue certains modèles d'évaluation du confort thermohygrométrique dans les bâtiments à ventilation naturelle, en se basant sur les approches adaptatives. L'accent est mis sur les traditions de construction mozambicaines
Ces études montrent toutes que le confort thermique pouvait être atteint, avec différentes solutions passives (matériaux et dispositifs) et que certaines de ces solutions pouvaient être transposée valablement dans des projets contemporains.

L'expérimentation in situ de bâtiments tropicaux a fait l'objet de nombreuses analyses, souvent en utilisant la température comme marqueur mais peu en utilisant la notion de confort.
A La Réunion, Garde (Garde et al., 2004) et Lucas (Lucas et al., 2002) ont été les premiers chercheurs à travailler sur le comportement thermique, hydrique et aéraulique de logements sociaux neufs construits dans le cadre du label ECODOM (Garde et al., 2004) et anciens (Lucas et al., 2002) .Les données mesurées ont été les températures et humidités intérieure et extérieures, les températures de globe noir et les vitesses d'air. Une station météorologique était localisée à proximité des opérations instrumentées. Les zones de confort de Givoni ont

été utilisées afin d'exploiter les résultats sous l'angle du confort thermique. Comme pour Toe et Kubota, les logements instrumentés étaient inoccupés.

2.2 Analyse typologique de l'architecture réunionnaise

En ce qui concerne l'architecture vernaculaire réunionnaise, un travail de recensement a été fait au niveau historique : (Leveneur, 2007), architectural :(Egon, 1983),(Rivière Noyre, 1980);(Vaisse and Barat, 1988). Mais aucune étude n'a été réalisée au niveau de l'évaluation des performances en termes de comportement et de confort thermique.

2.3 Sélection d'une maison représentative

Nous allons ici tenter de définir quelques archétypes spécifiques des maisons réunionnaises afin de choisir notre cas d'étude comme étant représentatif.

A la lumière des constats sur l'évolution de l'architecture réunionnaise présentés dans le chapitre 1 notre choix s'est porté sur une case créole dans le centre ancien de Saint Pierre. Au regard de ses caractéristiques architecturales (environnement planté, plan masse symétrique, varangues avant et arrière, construction en pans de bois, auvent pour protection solaire), et des différents points et études énoncé dans le chapitre précédent, on peut considérer que c'est un exemple représentatif de l'architecture vernaculaire de l'île de La Réunion. Il est décrit en détail dans la section 3.1 ci-après.

L'objectif de ce chapitre est donc d'apporter des éléments de compréhension du confort thermique d'une maison vernaculaire réunionnaise. Il s'agira d'abonder les études menées de par le monde (et présentées ci-avant), en particulier dans le monde tropical humide et voir si le confort thermique est acceptable dans une maison traditionnelle avec les principes passifs qui combinent végétalisation périphérique, ventilation naturelle et protections solaires.

Cet état initial du savoir semble important pour pouvoir en tirer des enseignements et les utiliser, les transposer, les adapter, les comparer aux projets actuels, ce qui reste l'objectif final de ce travail qui sera développé dans les parties 3 et 4.
La question posée est donc quel confort thermique est obtenu par une maison traditionnelle réunionnaise représentative des archétypes locaux, dans quel contexte géographique, climatique et avec quelles caractéristiques architecturales ?

3 Méthodologie

3.1 Description du cas d'étude

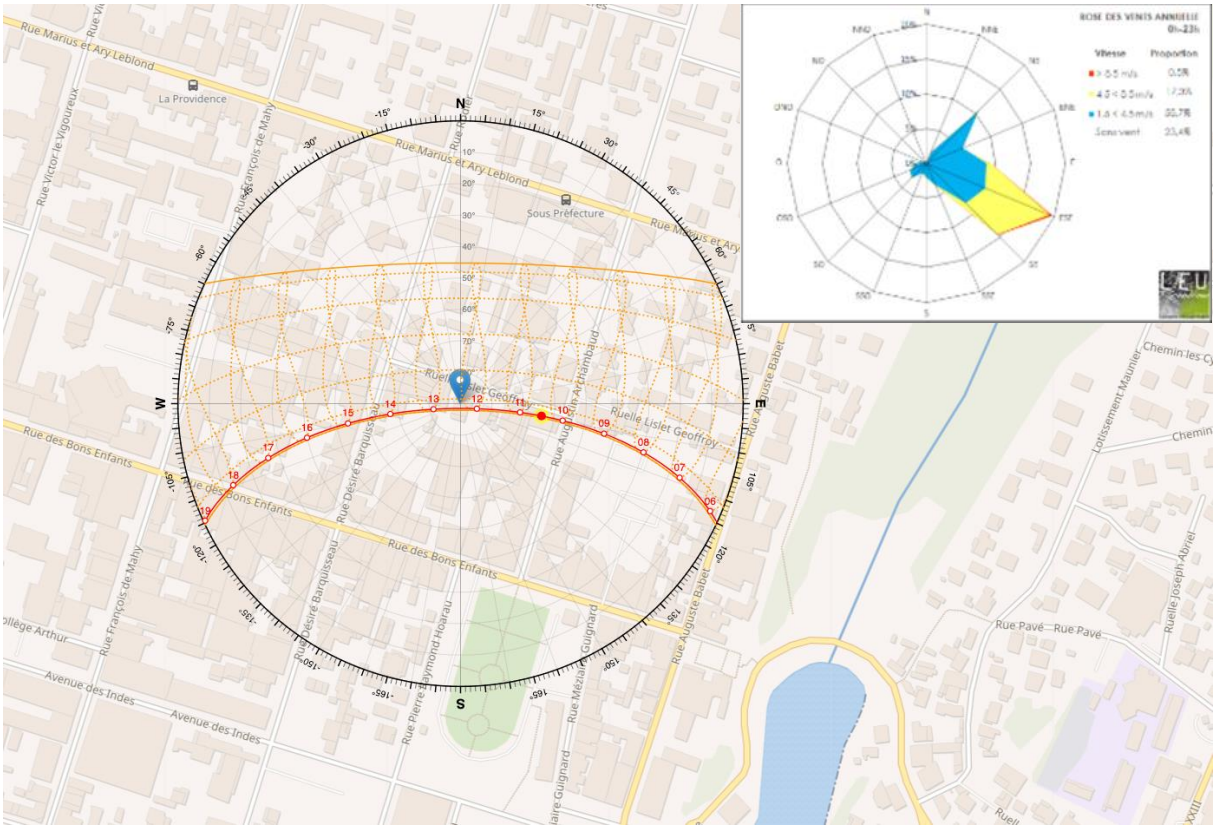


Figure 2- 1: Etude de cas maison Levieux – localisation, héliodon et rose des vents

3.1.1 Contexte climatique

3.1.1.1 Localisation :

21°20'4.25"S 55°28'32.00"E. Altitude environ 30m (voir Figure 2- 1)

3.1.1.2 Pluviométrie :

La case est située en limite de la zone avec 1000 mm de précipitations annuelle (voir Figure 2- 2), ce qui correspond à la partie basse et donc quasiment la moins humide de l'ile. Ces précipitations sont concentrées en saison chaude (saison cyclonique) et se combinent avec les températures les plus fortes.

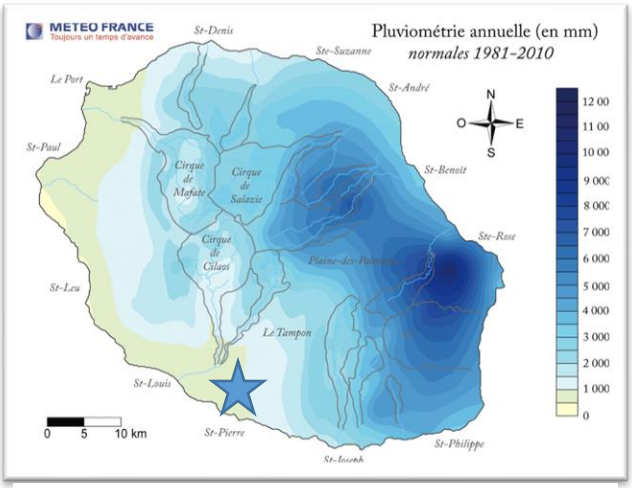


Figure 2- 2: Précipitations moyennes annuelles (Atlas climatique météo France)

3.1.1.3 Température moyenne annuelle :

La case est située dans la zone la plus chaude de l'ile, ceci est dû à sa localisation au niveau de la mer (voir Figure 2- 3).

L'intégration des données hygrométrie et température nous a permis d'établir un diagramme de Givoni (voir Figure 2- 4) diurne (de 8h00 à 18h00) qui illustre ces couples de mesure et permet d'approcher la notion de confort en intégrant la vitesse du vent. On constate qu'avec une vitesse d'air de 1,5m/s, 98% des points sont dans la zone de confort.

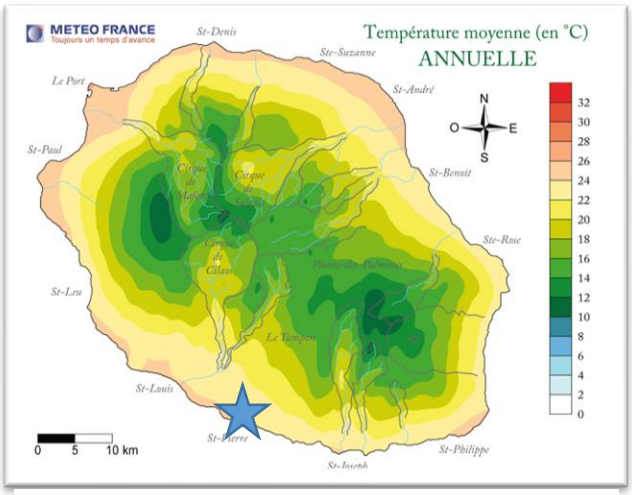


Figure 2- 3: Températures moyennes annuelles (Atlas climatique météo France)

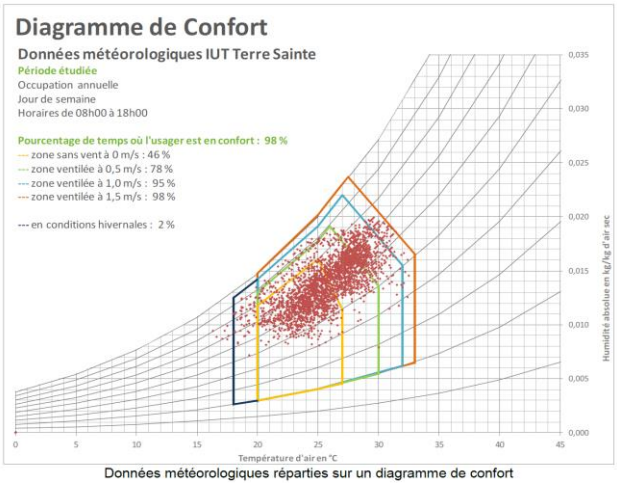


Figure 2- 4: Diagramme de Givonni Saint Pierre

3.1.1.4 Régime des vents :

L'île est soumise à l'influence des alizés (sud –Est), ils sont en permanence influencés par le relief marqué de l'ile et de manière fluctuante (voir Figure 2- 1et Figure 2- 5) par l'existence d'un régime de brises thermiques. Il convient d'affiner cette donnée et en particulier de distinguer la période chaude de la période froide pour pouvoir confirmer le potentiel de ventilation naturelle du site dans la période la plus défavorable. La validation, ou non, du concept architectural traditionnel sera alors possible

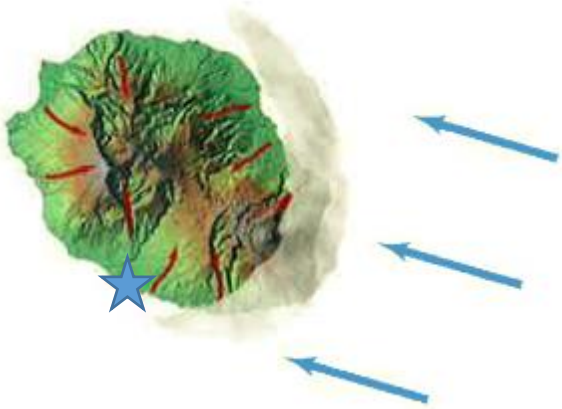


Figure 2- 5: Régime des vents (Atlas climatique météo France)

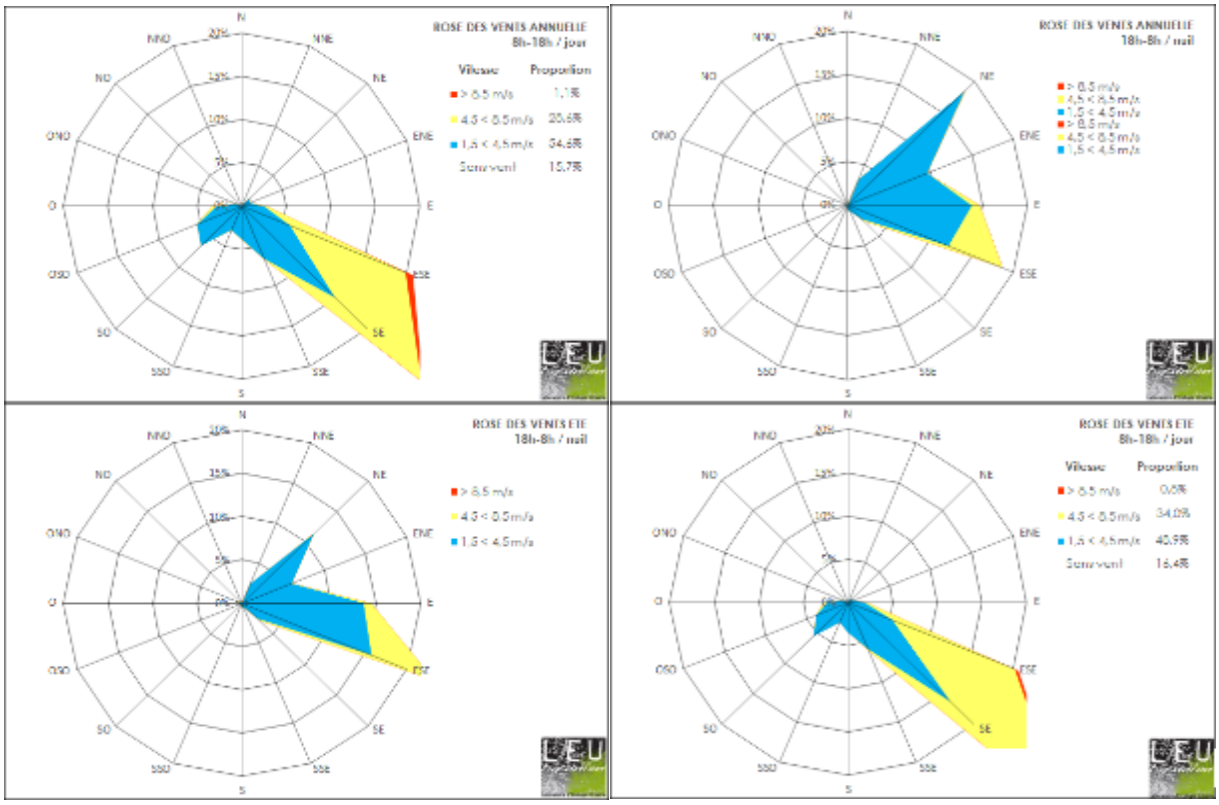


Figure 2- 6: Roses des vents annuelle de jour et de nuit, d'été de jour et de nuit - Source Météo France – schéma LEU Réunion

L'examen des roses des vents de Saint Pierre (voir Figure 2- 5 et Figure 2- 6) montre une faible différence entre saisons d'été et d'hiver pour la direction et l'intensité des vents. On note un fort vent d'alizé de secteur Sud Est tout au long de l'année et un potentiel élevé de 50% du temps avec un vent de vitesse supérieure à 7m/s.

C'est sur la variation de direction diurne et nocturne que se fait la différence notable avec l'inversion du régime de brise thermique.

Ce potentiel reste quasi identique en été, en particulier le jour, période qui nous intéresse le plus du fait de l'inconfort généré. Nous l'observons sur le diagramme de Givoni (voir Figure 2-4) et pour la période de mesure effectuée en mars.

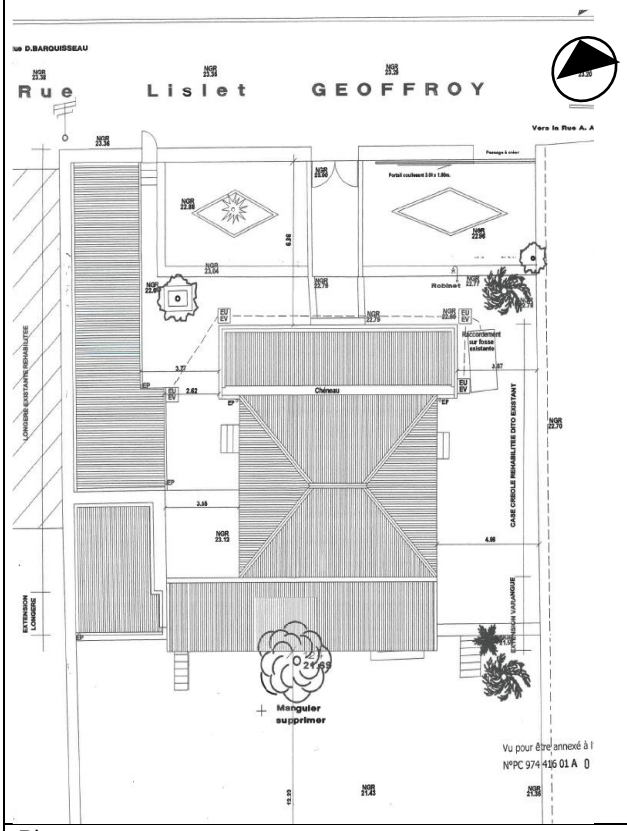
3.1.2 Description de la maison et de son contexte

Cette maison est située dans un contexte urbain, le centre-ville historique, dans la trame hippodamienne de Saint Pierre (voir Figure 2- 7). Son orientation répond aux critères de l'époque, à savoir basée sur la représentativité et l'exposition de la façade principale et son orientation parallèle à la rue.

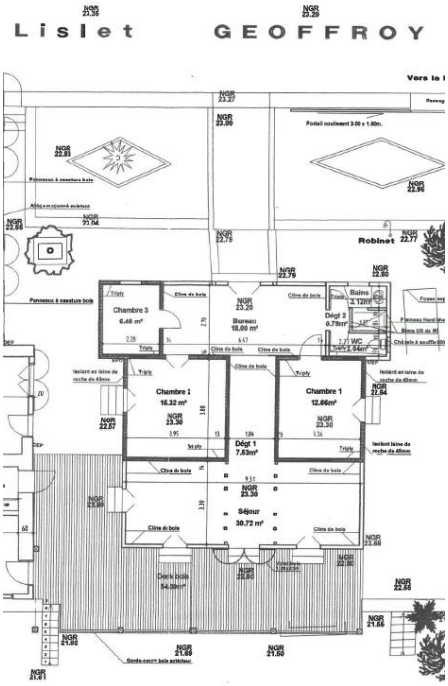
Les critères climatiques n'avaient pas cours dans le choix de l'orientation. C'était bien le critère social qui prévalait ici, comme le souligne Yves Augeard Architecte des Bâtiments de France dans un chapitre spécifique de Cases cachées (Vasse and Barat, 1988) .

Environnement urbain

Environnement au niveau de la parcelle



Plan masse



Vue en plan

Vue de la façade sud

Vue de la façade Nord

Figure 2- 7: Contexte climatique, géographique et architectural de la maison Levieux

Cette maison représente une surface habitable d'environ quatre-vingt-dix-sept m². Elle comprend trois chambres, un séjour, un bureau, un cabinet d'aisance, une salle de bain (voir Tableau 2- 1). La cuisine est une construction qui se situe hors de la maison, comme c'était traditionnellement le cas pour des raisons de risque d'incendie, celle-ci ne sera donc pas étudiée.

Tableau 2- 1: Tableau de surfaces de la maison Levieux

	Superficie m²
Chambre Est	12,66
Chambre Ouest	15,32
Chambre 3	6,4
Séjour	30,72
Varangue Nord	18,00
Salle d'eau	3,12
Toilettes	2,04
Dégagement intérieur centre	7,5
Surface totale intérieure	95,76
Varangue Sud	54,00
Surface totale	149,76

La maison (voir Figure 2- 7 et Figure 2- 8) est placée rue Lislet Geoffroy, à l'Est se trouve une maison individuelle récente à R+1, à l'Ouest, en mitoyenneté, un immeuble en béton des années cinquante à R+3, au Sud un bâtiment ancien type entrepôt en moellon, la Caisse d'Epargne et de l'autre côté de la rue une maison individuelle en vis-à-vis. A l'exception de l'Ouest, le contexte actuel correspond peu ou prou au contexte initial lors de la construction de la maison.

Figure 2- 8: Localisation de la Maison Levieux (© Google Earth)

L'environnement global est du type urbain moyennement dense avec des constructions de R+1 à R+3 alentour. La topographie est marquée par une pente générale vers la mer au Sud et la présence de la Rivière d'Abord à l'Est.

3.1.3 Environnement proche de la maison

L'environnement immédiat de la maison est représentatif d'un fonctionnement traditionnel (voir Figure 2- 9). Elle est située, côté rue au Nord, en retrait au bout d'une allée en terre cuite, derrière un barreau créole (portail d'entrée). A l'opposé, au Sud, elle s'ouvre sur un jardin arrière. A l'Ouest, en mitoyenneté se trouve une longère et une allée, tandis qu'à l'Est une autre zone minérale la sépare du mur mitoyen. On se retrouve, à l'exception courante de la présence d'une longère latérale, avec une organisation traditionnelle et symétrique de la

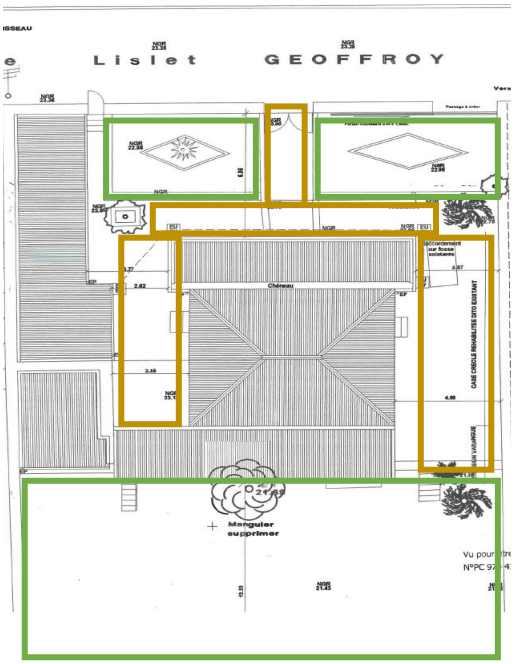


Figure 2- 9: Environnement proche de la maison, minéral en marron et végétal en vert

maison au milieu de sa parcelle plantée.

3.1.4 Caractéristiques techniques de la maison

Le Tableau 2- 2 précise la nature des matériaux de construction, certains éléments architecturaux, éléments d'ombrage, végétation environnante, caractéristique des ouvertures.

La maison est construite en ossature bois sur un soubassement ventilé en moellon, à l'image de nombreuses maisons traditionnelles réunionnaises.

Tableau 2- 2: Description de la Maison Levieux – matériaux et dispositifs architecturaux

Aspect	Description
Matériau de construction	
Structure	Pans de bois
Toiture	Tôle ondulée, 4 pans à 45° (toit principal)
Plafond	Planches de bois
Plancher	Bois sur vide sanitaires ventilé
Murs extérieurs	Clins de bois (2cm) et tôle plate sur ossature bois 15cmX15cm
Cloisons intérieures	Bois et Placoplatre
Fenêtres	Bois et verres à petits carreaux (dit à petit bois)
Portes	Bois et verre à petit carreaux (dit à petit bois)
Eléments d'ombrage	
Auvents	Façade Ouest : auvents isolés au-dessus des ouvertures avec volets pleins ; Façade Est : auvents isolés au-dessus des ouvertures avec volets pleins ; Façade Nord : auvent continu sur la façade.
Varangue	Façade Sud
Arbres environnants	Parcelle plantée au Sud et au Nord (palmiers multipliant, palmiers, bananiers, frangipanier…)
Caractéristiques des ouvertures	
Porosité des façades (voie définition annexe 1 chapitre 1)	Façade Nord 29% - façade Sud 18,5% ; Façade Ouest 9,5%- façade Est 8%. Impostes persiennées en façade Nord
Autres éléments	
Matériau de toiture	Tôle couleur blanche
Hauteur sous plafond	3,00m
Murs extérieurs	Clins de bois et tôle plate de couleur blanche
Isolation	Laine de verre sous toiture

L'usage de volets pleins au lieu de volets persiennés s'explique par le besoin d'une bonne protection en cas de cyclone et une meilleure protection à l'effraction.

La maison est traversante entre le bureau et le séjour par le biais d'un dégagement. Les deux chambres latérales, Est et Ouest, sont mono-orientées et s'ouvrent sur le bureau au Nord (voir Figure 2- 10). L'importance de l'organisation intérieure et de la disposition des ouvrants dans le potentiel de ventilation naturelle a été mise en évidence (Prianto and Depecker, 2003) (F Picgirard - J Gandemer, 2012). Les fichiers météo (voir Figure 2- 7) montrent clairement une incidence majoritaire Sud Est des alizés, ce qui conforte le potentiel de ventilation traversante de la succession de pièces : séjour, dégagement bureau Nord. Les chambres sont, elles, moins favorisées, elles dépendent de l'ouverture de la porte donnant sur le bureau Nord.

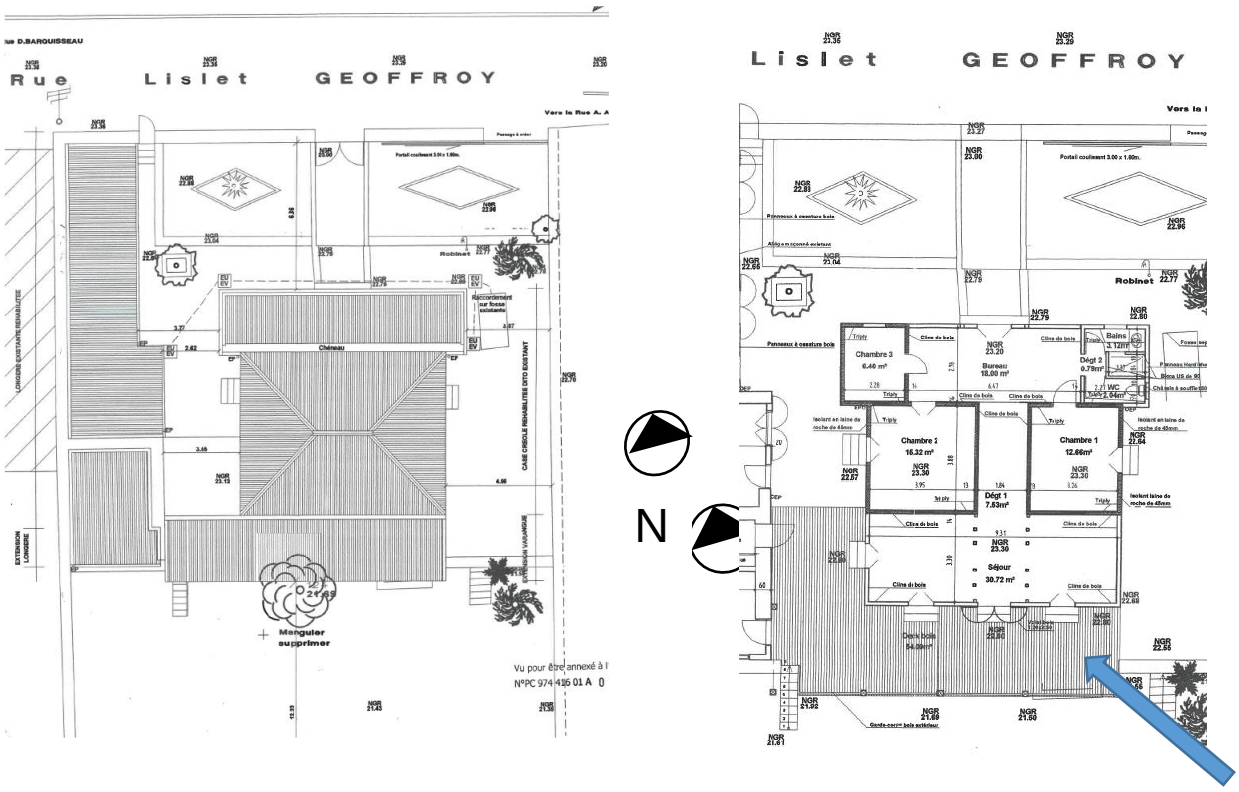


Figure 2- 10: Plan de masse et plan de rez de chaussée – © Antoine Perrau architectures

3.2 Descriptif expérimental

3.2.1 Données météo pendant la campagne de mesure

La campagne de mesure s'est étalée durant la saison chaude 2017-2018 et a duré un peu plus de quatre mois entre novembre 2017 et avril 2018.
La station météo la plus proche est celle du campus universitaire de Terre Sainte. Elle est distante de 3,6 Km, au vent de la maison Levieux comme le montre la Figure 2- 11. Sa proximité du site d'étude et donc des conditions comparables, permettent de la considérer comme la station de référence pour notre étude.
Il y a été recensé un mois de Mars pluvieux et plus frais que les moyennes saisonnières, de même que des périodes plus ou moins ventées.
Ces baisses de température ponctuelles et ces variations de régime de vent permettront :

- D'identifier des séquences climatiques chaudes ventées et peu ventées. Ces séquences permettront de voir l'influence de la donnée « vent » sur les conditions de température et d'humidité dans la maison ;
- De comparer les jours les plus chauds (jours ensoleillés) des jours frais (jours pluvieux) qui représenteront respectivement un fonctionnement « saison chaude » et un autre plus « saison froide ».

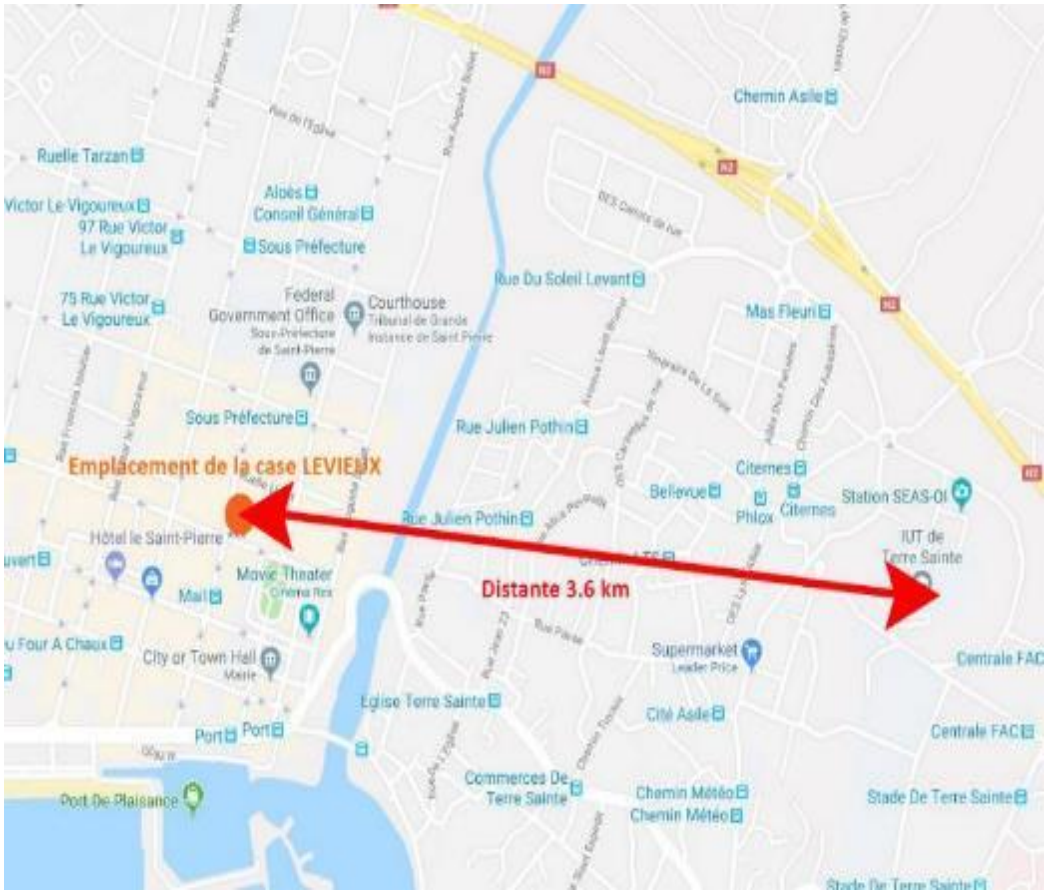


Figure 2- 11 : localisation de la maison Levieux par rapport à la station de l'IUT

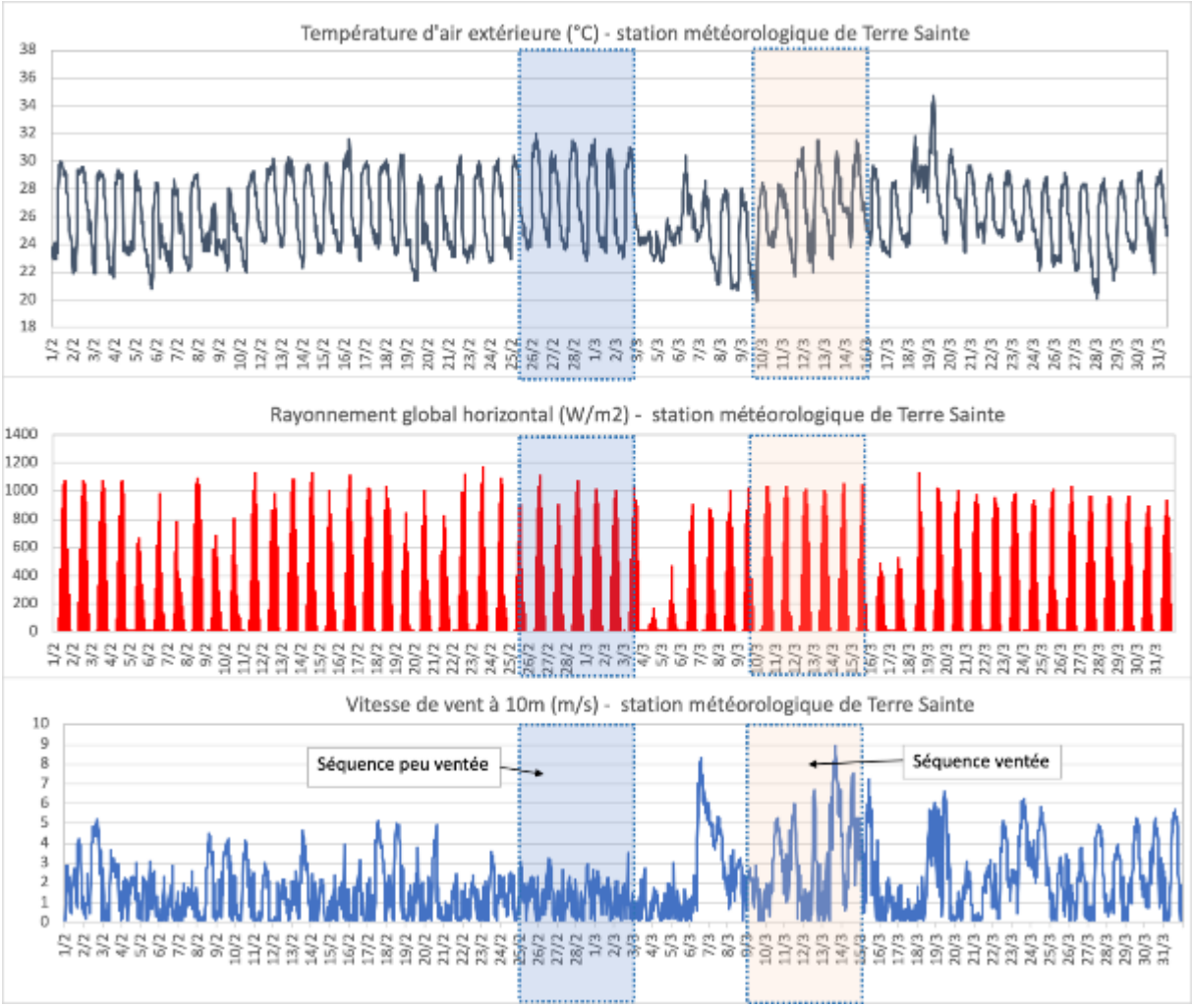


Figure 2- 12: Données climatiques relevées sur la station météorologique de Terre Sainte – Février Mars 2018.

La Figure 2- 12 montre les données climatiques relevées sur Terre Sainte pendant les mois de février et mars 2018. Nous avons préféré par soucis de clarté montrer uniquement deux mois de données.

L'analyse des données climatiques sur la période de mesure a permis d'identifier :

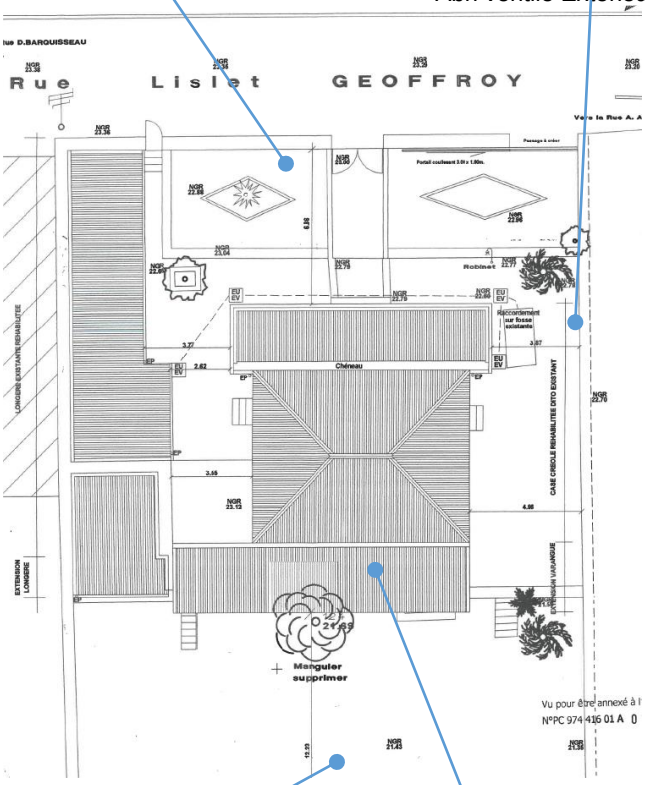
- Deux séquences climatiques chaudes, avec des températures similaires, intéressantes et différentes en termes de régime de vent, une séquence « peu ventée » (du 26 février au 3 mars 2018) et une séquence ventée (du 10 mars au 15 mars 2018) ;
- Trois jours « type » : Jour ensoleillé (26 Décembre 2017), jour nuageux (30 Mars 2018) et jour pluvieux (4 Mars 2018).

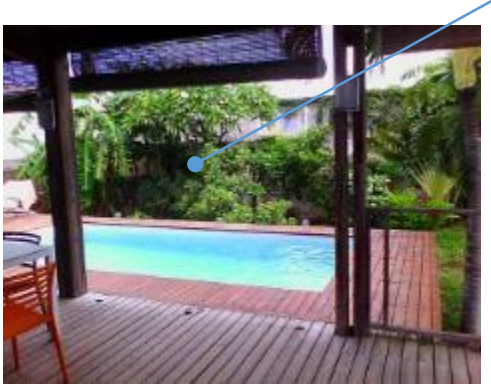
3.2.2 Capteurs utilisés et localisation

Pour cette instrumentation les capteurs utilisés étaient du type Testo 174 H. Ils mesurent la température et l'humidité relative. Ils ont fait l'objet d'un étalonnage avant mesures. Le pas de temps utilisé était de 30mn.
Six capteurs ont été placés en différents points, 4 à l'extérieur tel que représenté sur la Figure 2- 13 et 5 à l'intérieur de la maison tel que représenté sur la Figure 2- 14.
Les capteurs positionnés à l'extérieur étaient placés dans un abri ventilé afin de les protéger du rayonnement extérieur.
Les capteurs intérieurs, à l'exception de celui positionné dans la charpente, sont à des hauteurs comparables (entre 0,6 et 1,5m) évitant des disparités liées à la stratification thermique.

Abri ventilé Extérieur Nord

Abri ventilé Extérieur Est





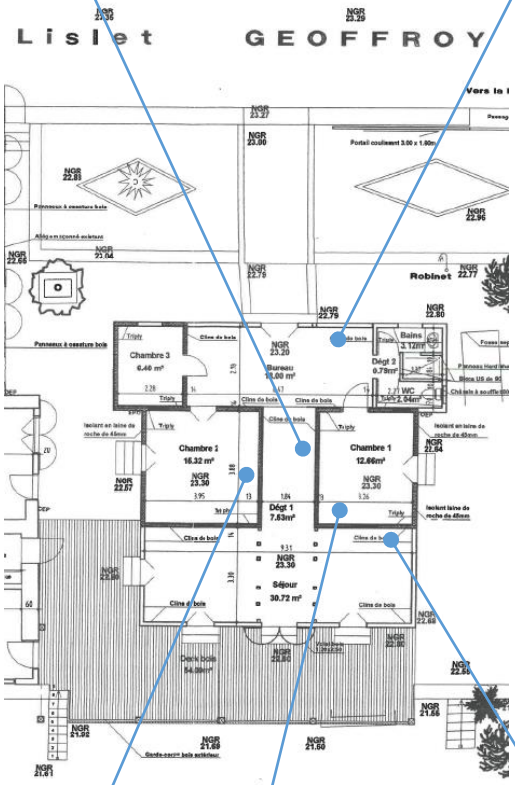
Abri ventilé Extérieur Sud

Abri ventilé varangue Sud

Figure 2- 13: Localisation des capteurs extérieurs de température et d'humidité sur la parcelle

Intérieur centre (sur la charpente)

Varangue Nord (bureau)



Chambre 2 Ouest

Chambre 1 Est

Séjour

Figure 2- 14: Localisation des capteurs intérieurs de température et d'humidité dans la maison

3.3 Sorties étudiées

Les analyses et résultats seront présentés dans la section suivante « Résultats et discussion ».

Dans un premier temps, nous analyserons les deux séquences de données climatiques retenues et les comparerons avec les données de capteurs extérieurs et afin d'identifier le capteur extérieur le plus représentatif du climat « local » autour de la maison.

Dans un second temps, nous analyserons le comportement thermique de la maison au travers de différentes sorties qui seront :

- L'évolution des températures d'air et d'humidité relative des capteurs intérieurs sur les deux séquences de 6 jours ventée et non ventée afin de regarder l'influence de la donnée « vent » sur les amplitudes de température, sur le déphasage des données et sur les données maximales ;
- Les données statistiques (boîtes à moustache) de diverses pièces sur les deux séquences de mesure ;
- Les conditions de confort en utilisant les zones de confort de Givoni. Celles-ci permettent de définir le confort en fonction de zones de confort liées à la vitesse du vent. Cependant, celui-ci a été adapté (zone 1 m/s) à La Réunion afin de répondre aux besoins de la population locale à partir des travaux de thèse d'Aurélie Lenoir (Lenoir, 2105) (voir Figure 2- 15). Il permet d'avoir une approche du confort thermique d'une construction et d'en tirer des enseignements à l'instar des études menées par R Hyde (Hyde and Docherty, 1997b).ou Szokolay (Szokolay, 1986).

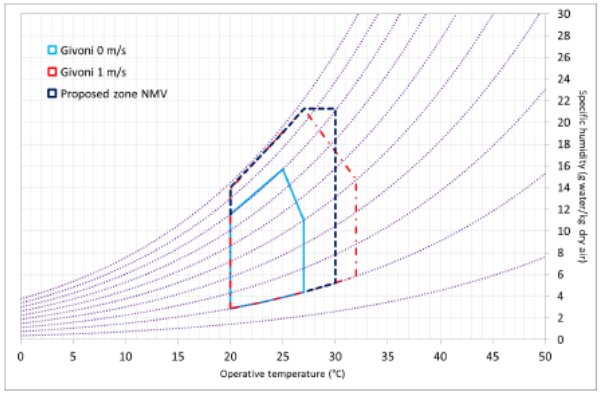


Figure 2- 15: Proposition d'Aurélie Lenoir de modification de la zone de confort en milieu tropical © A Lenoir

Enfin, nous terminerons ce chapitre par une analyse des pièces et de l'environnement à l'aide d'une caméra thermique.

4 Résultats et discussion

4.1 Analyse des données climatiques extérieures

4.1.1 Séquence ventée : 10 au 15 mars 2019

La comparaison des températures entre la station de référence et les capteurs extérieurs montre des températures globalement supérieures pour les capteurs Sud et Est-ce qui s'explique sans doute par leur exposition plus marquée aux incidences solaires Nord pour le premier et Ouest pour le second à partir de la mi-journée (voir Figure 2- 16). Les températures du capteur Nord et le capteur varangue Sud sont plus proches, en restant supérieures à la station de référence. Cette différence d'environ deux degrés est conforme à l'influence du contexte urbain et minéral (effet d'îlot de chaleur). Sur cet aspect ce sont donc les deux capteurs qui nous serviront de référence pour les conditions locales extérieures de température et d'humidité.

La comparaison des mesures d'hygrométrie montre là encore que le capteur varangue Sud est très proche de la station de référence, alors que l'environnement planté du capteur Nord génère des différences importantes sans doute dues à l'évapotranspiration des végétaux.

Nous proposons donc de retenir le capteur varangue Sud comme capteur de référence pour la mesure de données locales extérieures de température et d'humidité.

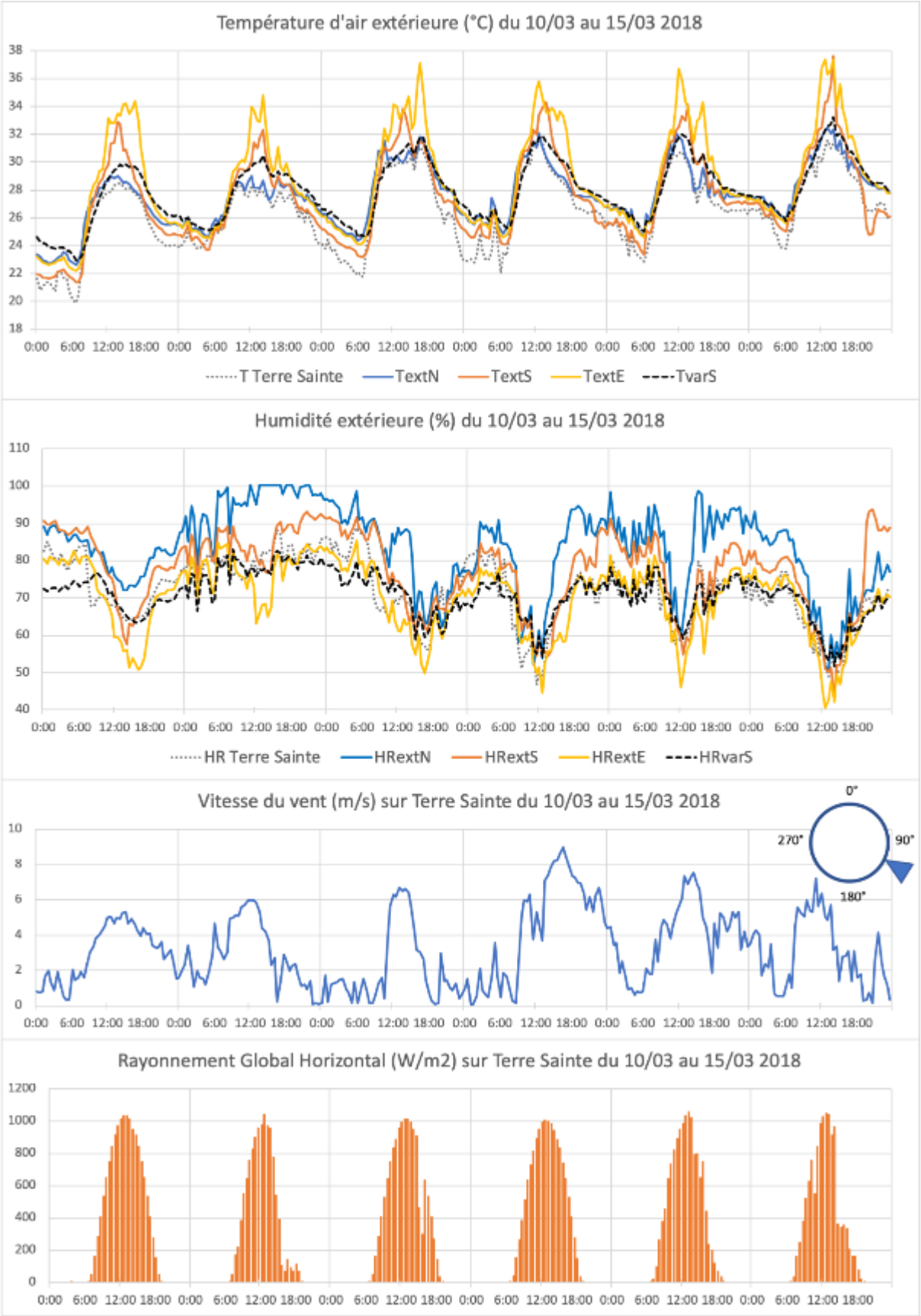


Figure 2- 16: Séquence climatique chaude et ventée du 10 mars au 15 mars 2019

4.1.2 Séquence peu ventée : 26 février au 03 mars 2019

Sur la séquence peu ventée, les résultats restent comparables avec la séquence ventée. On note des différences de températures moins marquées du fait du rayonnement moins important, du sans doute à une plus forte nébulosité du fait d'un vent plus faible (voir Figure 2-17). Le capteur varangue Sud reste le plus significatif par rapport à la station de référence. On note, comme pour la séquence ventée, qu'il y a un écart de 2°C environ la nuit entre la station de référence de l'IUT et le capteur varangue Sud du fait de l'effet d'ilot de chaleur urbain.

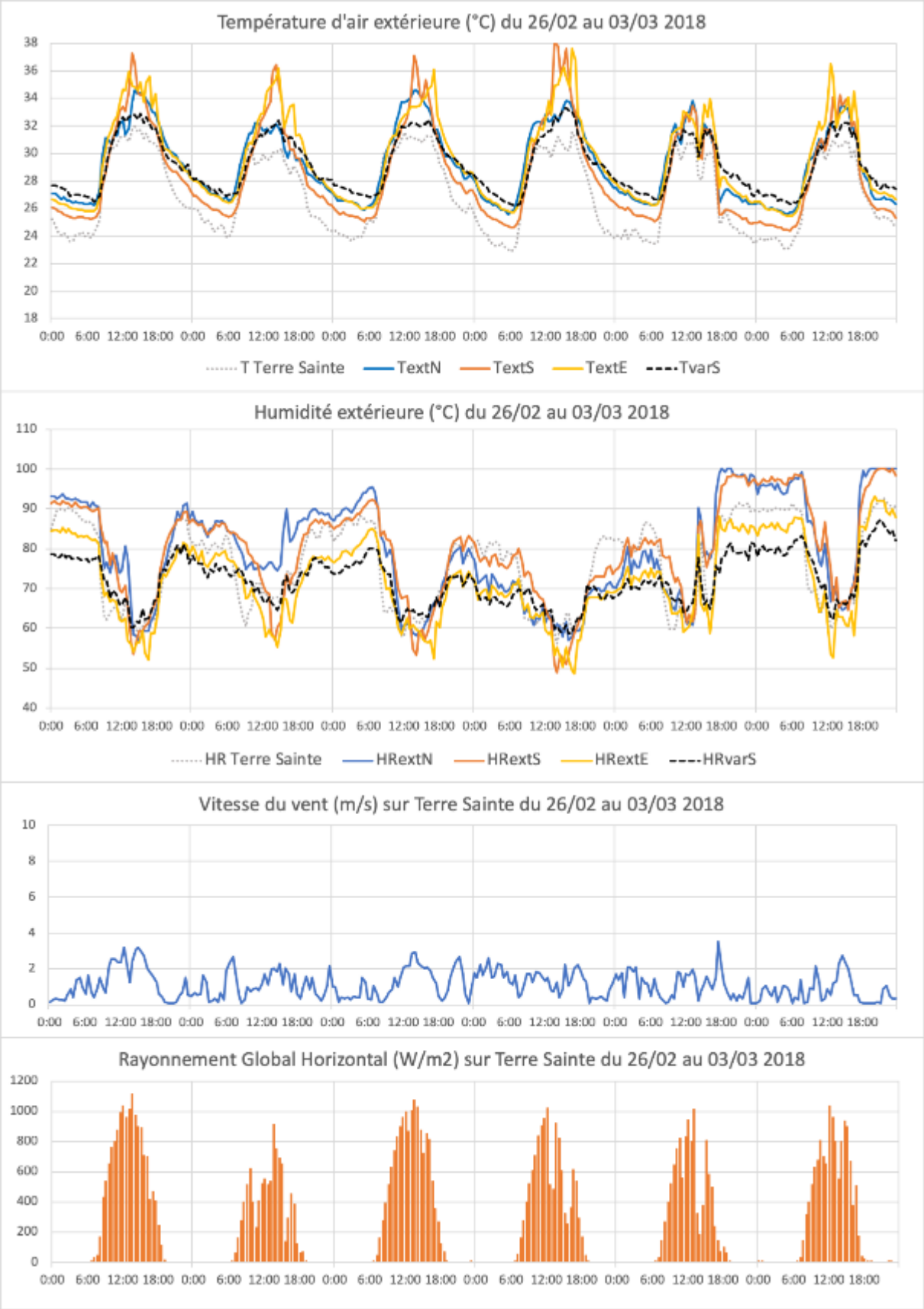


Figure 2- 17: Séquence climatique chaude et peu ventée du 26 février au 03 mars 2019

4.1.3 Conditions extérieures et zones de confort de Givoni

La comparaison des diagrammes de Givoni (voir Figure 2- 18) met en évidence les différences de températures maximales entre l'extérieur Nord et les extérieurs Sud et Est. Les températures les plus élevés sont celle du capteur Est, son positionnement sur un mur sombre faisant face à l'Ouest, exposé au soleil de l'après-midi et dans un environnement peu végétal explique cela.

Il en de même pour le capteur sud, dans une moindre mesure, il est aussi exposé au soleil du Nord, sur un mur, mais dans un environnement plus végétal. Le capteur Nord, protégé par l'ombre d'un bougainvillier et dans un environnement végétal affiche donc des températures moins élevées, mais une hygrométrie plus forte du fait de ces mêmes végétaux.

La varangue Sud avec ses extrémums moins marqués (nuage de points le plus concentré), illustre le rôle d'un abri ventilé correctement et de ce fait plus confortable (sauf la nuit), par des températures et une hygrométrie plus faible.

Avec 95% des points dans la zone de confort de 1m/s, la varangue Sud, bien protégée du rayonnement, dans un environnement végétal et bien ventilée, offre un bon confort. C'est aussi ce capteur qui offre des températures les plus proches de celles observées à la station de référence (sauf la nuit). Il nous servira donc de base de comparaison ultérieurement avec les mesures des capteurs intérieurs.

Les autres capteurs, mal ombragés pour les capteurs Est et Sud, directement dans la végétation pour le capteur Nord, offrent des conditions plus dégradées avec seulement 60% des points dans la zone de 1 m/s. Ceci illustre l'importance de l'ombrage des espaces extérieurs et de la végétation peut être aussi une dérive des abris liée au rayonnement des parois proches.

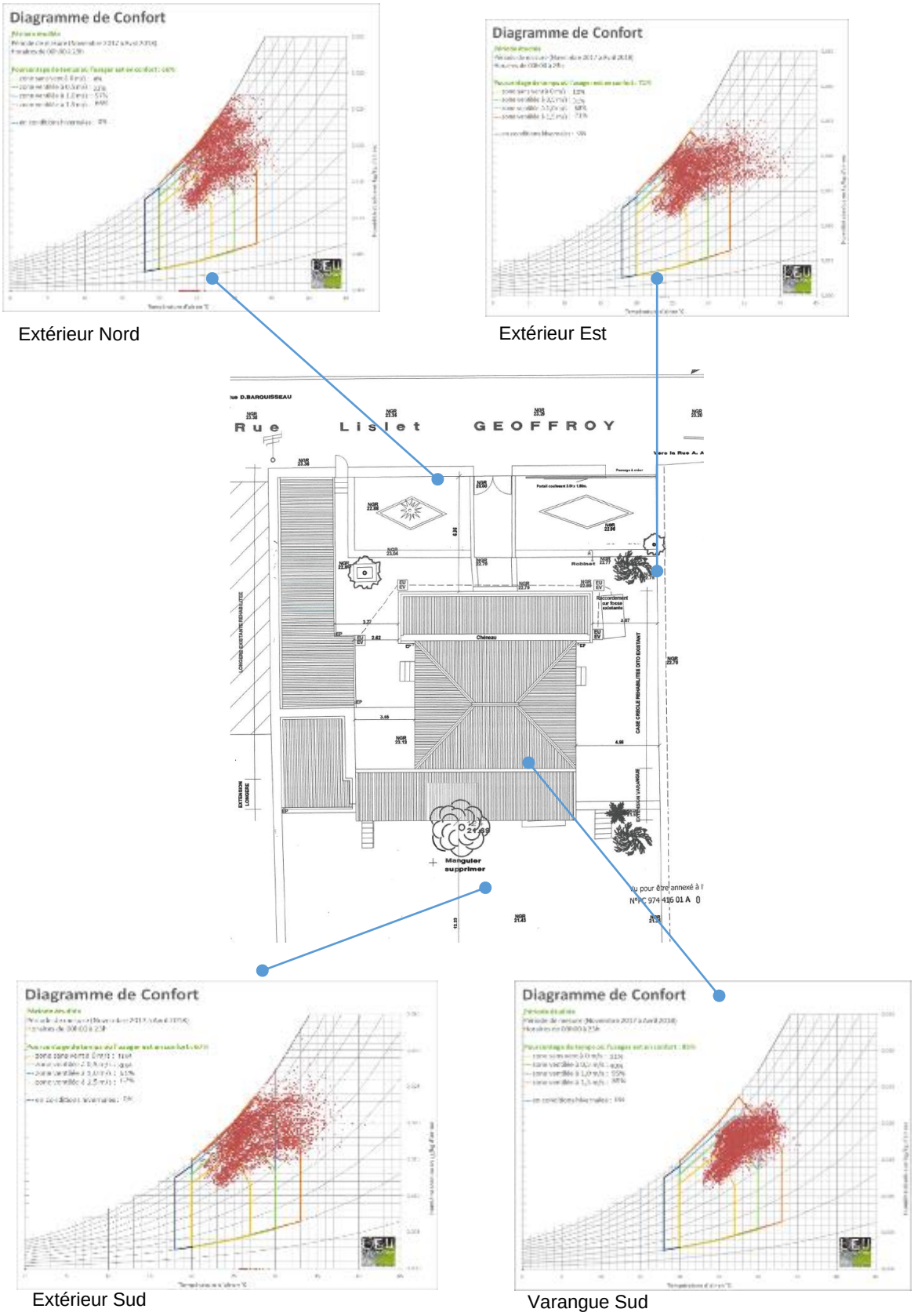


Figure 2- 18: Analyse des conditions extérieures avec les zones de confort de Givoni

4.2 Analyse des températures d'air et des humidités relatives entre pièces

4.2.1 Séquence ventée (10 au 15 mars 2018)

Nous allons ici comparer la température et l'hygrométrie entre le capteur extérieur de référence, varangue Sud, les données de la station météo et les différents capteurs intérieurs.

On note une différence de température nocturne (fin de nuit) entre la station et le capteur varangue Sud de l'ordre de 4 °C et plus marquée d'environ 2 °C avec les pièces intérieures. Le salon, pièce la mieux ventilée de par son caractère traversant restant la pièce la moins chaude avec 1 à 2°C de différence. La varangue Nord, mal protégée du soleil par un auvent pas assez large et la plus exposée est la plus chaude.

Le décalage global des courbes vers la droite illustre l'inertie du bâtiment, qui reste peu marqué, du fait des matériaux de construction (tôle et bois) ou un défaut de ventilation.

La chambre Ouest a les extrémums les moins marqués (voir Figure 2- 19). Elle est moins chaude du fait de l'effet de masque à l'Ouest du bâtiment mitoyen et se rafraichit moins du fait de son inoccupation (absence de ventilation), ce qui est confirmé par une hygrométrie nettement plus élevée que les autres pièces.

Globalement, à l'exception de la varangue Nord, la température intérieure diurne reste inférieure à la température extérieure varangue Sud en journée, ce qui montre un bon comportement global de la maison et de son environnement.

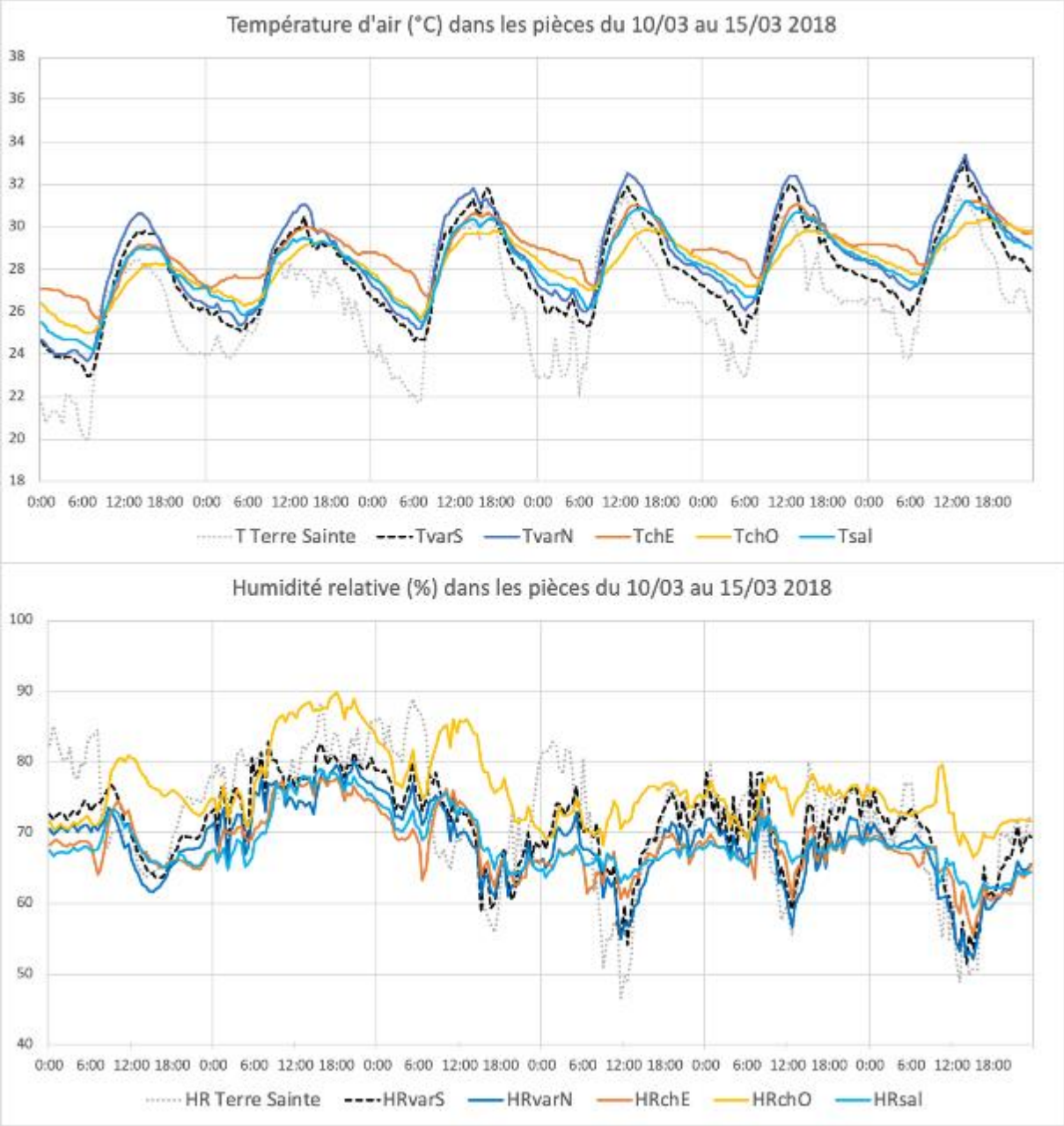


Figure 2- 19: Séquence ventée : Températures d'air et humidités relatives dans les pièces du 10 au 15 mars 2018

4.2.2 Séquence peu ventée (26 février au 3 mars 2018)

Les tendances observées sur la séquence des jours ventée sont ici confirmées mais avec des amplitudes de température plus marquées (voir Figure 2- 20). Ceci confirme le rôle de la ventilation dans l'évacuation de la surcharge thermique.

Les différences d'hygrométrie entre pièces ventilées ou non corroborent le rôle de la ventilation dans l'évacuation de l'humidité et de ce fait l'amélioration du confort.

Malgré la moins bonne ventilation, globalement, à l'exception de la varangue Nord, les températures diurnes intérieures restent là encore inférieures à la température extérieure varangue Sud. La nuit les températures intérieures sont supérieures à la varangue Sud, mais étant plus basse que le jour le confort y reste acceptable.

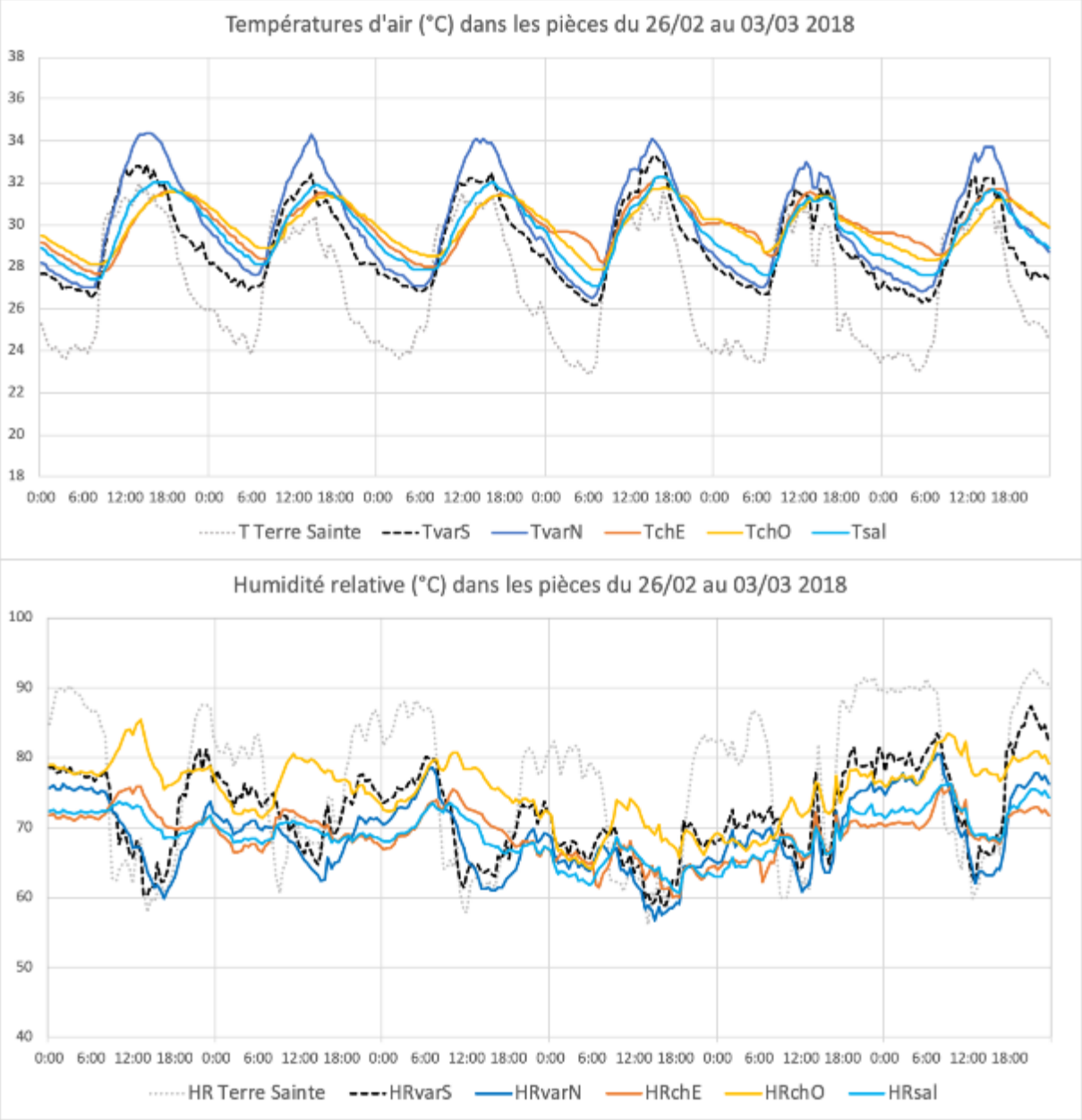


Figure 2- 20: Séquence peu ventée : Températures d'air et humidités relatives dans les pièces du 26 février au 03 mars 2019

Discussion :

Le comportement de la maison dans cet environnement nous montre les résultats suivants :

En termes d'amplitude des températures, les jours ventés apportent une amélioration d'environ 2°C.

Le déphasage de l'ordre de 2h, illustre une inertie moyenne du bâtiment.

La surchauffe globale de l'environnement, d'environ 2°C est due à l'impact de l'environnement minéral et urbain. La pièce la plus chaude, la varangue Nord est aussi la pièce exposée au soleil et mal protégée du rayonnement (auvent trop petit). L'exposition et les protections solaires jouent donc un rôle notable dans le confort intérieur.

La maison, pour les locaux bien ventilés ou occupés a globalement des températures diurnes inférieures à la température extérieure de référence et une hygrométrie plus faible, ce qui illustre le rôle de la ventilation et des usages dans le confort.

4.2.3 Influence du milieu extérieur sur le milieu intérieur

Nous proposons ici de comparer le comportement hygrothermique de la maison et ses abords dans différentes conditions météorologiques (voir Figure 2- 21):

- Jour ensoleillé : 26 Décembre 2017 (température les plus chaudes) ;
- Jour nuageux : 30 Mars 2018 ; (températures les plus chaudes) ;
- Jour pluvieux : 4 Mars 2018. (Températures les plus froides).

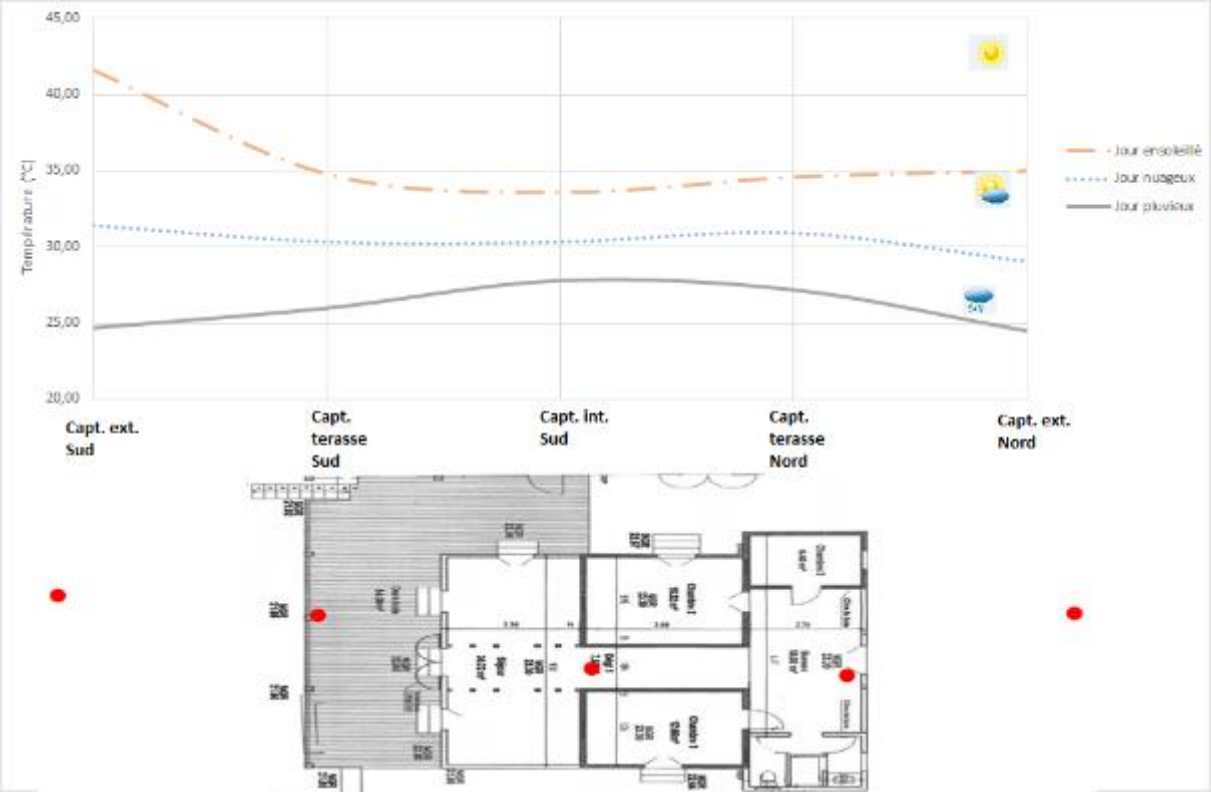


Figure 2- 21: Evolution des températures en différents points de mesure extérieurs et intérieurs – graphique (au-dessus) et localisation des capteurs en plan (au-dessous)

Discussion :

Durant ces trois journées type on note deux comportements thermiques différents :

Le jour ensoleillé et le jour nuageux montrent une température intérieure toujours inférieure à la température extérieure, illustrant le rôle des varangues comme espace tampon.

Le jour pluvieux, avec des températures extérieures inférieures, montre-lui une température intérieure supérieure. Ceci illustre le rôle d'évacuation de la surcharge thermique par la ventilation, dans ce cas de figure les ouvertures ont vraisemblablement été fermées par les usagers, limitant le rafraîchissement intérieur qui n'était pas nécessaire pour rester en confort et générant de ce fait une augmentation de la température intérieure.

On note aussi de manière très nette l'influence de l'albédo, ou d'un capteur voyant le soleil, sur l'élévation de la température ambiante avec des températures sensiblement plus élevées en extérieur Sud le jour ensoleillé.

Au-delà du rôle des espaces tampons des varangues, la ventilation traversante permet de réduire l'élévation de température intérieure et de garantir le confort en saison chaude dans cette maison.

4.2.4 Analyse des données statistiques

L'analyse statistique des données de température d'air avec les boites à moustache (voir Figure 2- 22), qui illustre des moyennes statistiques, montre des amplitudes nettement moins marquées pour les chambres Ouest et Est et le séjour par apport à la varangue extérieur sud et la donnée météo de référence. Là encore l'inertie du bâtiment écrêtant les extrémums est illustrée. Les températures moyennes y sont aussi plus élevées de 2 °C que la varangue extérieure Sud en période peu ventée et de 1°C en période ventée. Ceci montre le rôle de la ventilation. La plus forte amplitude de la varangue Nord, qui est très vitrée, illustre le rôle du rayonnement direct (échauffement), le jour et de la faible isolation des parois la nuit (rafraichissement plus rapide et plus important).

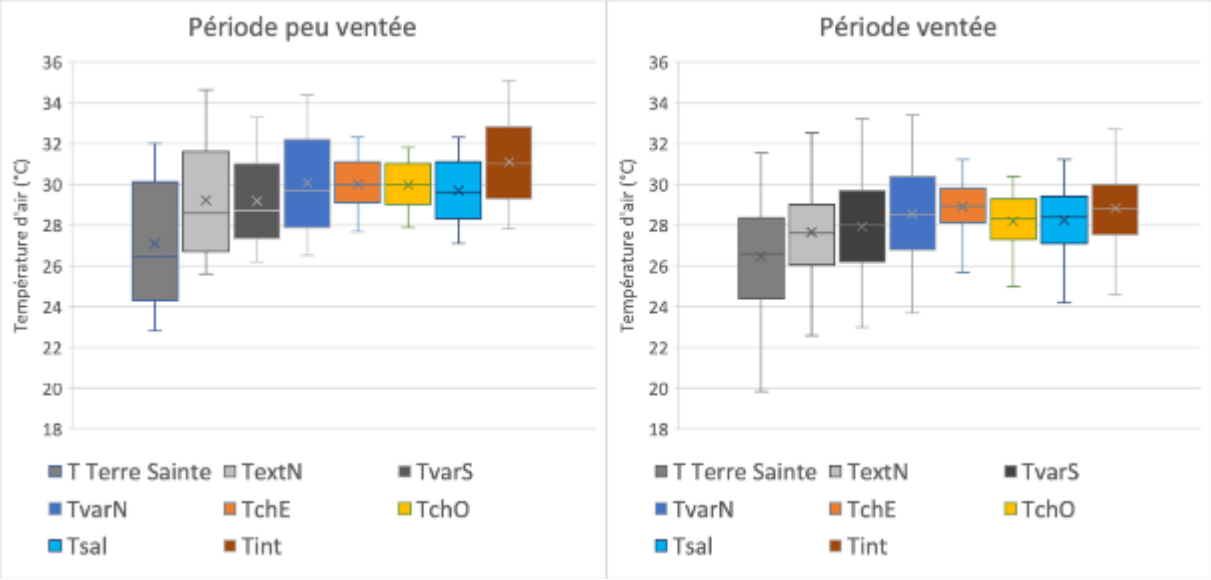


Figure 2- 22: Analyse statistique des données de température d'air. Période peu ventée (à gauche) et période ventée (à droite)

4.3 Analyse des diagrammes de Givoni dans les pièces intérieures

La comparaison des diagrammes de Givoni (voir Figure 2- 23) illustre les variations de confort selon les pièces de la maison.

La chambre Ouest est moins chaude, mais plus humide que la chambre Est. Le taux plus élevé d'hygrométrie s'explique par le fait que cette chambre était inoccupée et donc peu ouverte, durant les mesures. Par contre, le bâtiment mitoyen la protège efficacement (effet de m asque) du rayonnement d'Ouest et de ce fait limite la montée en température.

On constate que l'intérieur centre donne les températures les plus élevées, ceci s'explique par la position du capteur en hauteur, dans la charpente. Il y est plus exposé au rayonnement de la toiture et la chaleur s'y concentre par convection naturelle. L'hygrométrie y reste comparable avec les autres capteurs (à l'exception de la chambre Ouest).

La varangue (bureau) Nord donne des températures globalement plus élevées que les autres pièces du fait de la faible protection solaire de cette façade et de sa forte exposition (l'auvent continu y est insuffisant). Ceci illustre l'importance du bon dimensionnement des protections solaires.

Le séjour et la chambre Est, proposent des conditions très similaires avec toutefois des températures minimales plus faibles pour le séjour, sans doute du fait de son plus faible taux d'occupation et de sa meilleure ventilation par le dégagement.

Avec 97% du temps dans la zone de confort de 1m/s, les locaux correctement protégés et ventilés (chambre Est et séjour) proposent un confort certain.

Dès qu'un de ces paramètres est négligé (mauvaise protection solaire de la varangue Nord, défaut de ventilation de la chambre Ouest) le confort baisse sensiblement à environ 80% du temps dans la zone de confort de 1m/s.

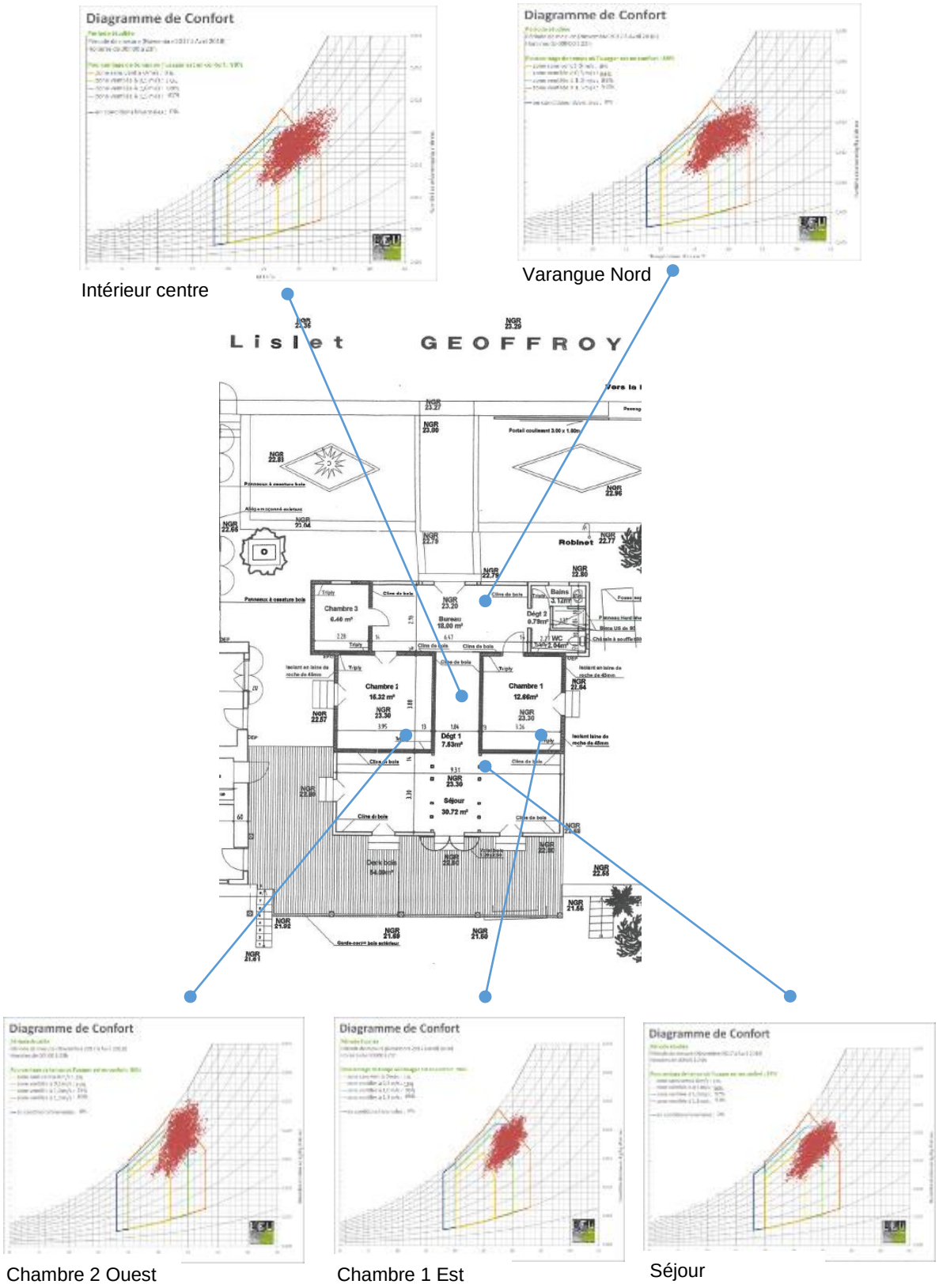


Figure 2- 23: Diagramme de Givoni pour les pièces intérieures. Le séjour reste la pièce la plus confortable car cette pièce est dans le sens traversant de la maison Nord-Sud alors que les chambres ne sont pas traversantes.

Les diagrammes de confort montrent que l'intérieur de la maison atteint un pourcentage de confort pour les pièces occupées environ 95% du temps. Il est obtenu, soit par la ventilation naturelle (jours ventés) qui sont très fréquents, soit par l'usage de brasseurs d'air pour les jours chauds sans vent (sans pouvoir les différencier avec cette étude).

On constate que le salon (97% de confort) et la varangue Nord (89% de confort à 1m/s) sont plus confortables que la chambre Ouest (76 % de confort à 1m/s) grâce aux meilleures protections solaires (varangue ouverte au Sud) et au meilleur potentiel de ventilation traversante de ces locaux.

Les capteurs extérieurs permettent de mettre en avant les différences de confort engendrées par les variations du milieu : minéral (Est) et végétal (Nord). Le rôle positif du végétal y est ici conforté (voir Figure 2- 24).

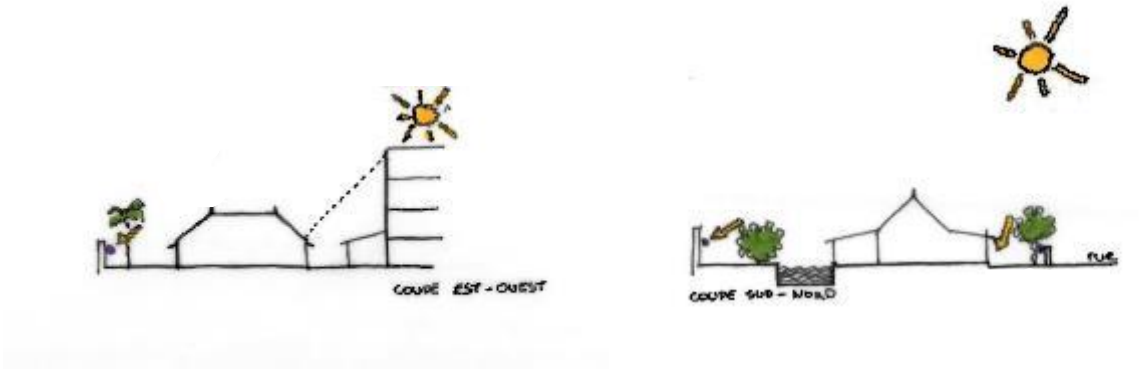


Figure 2- 24: Croquis illustrant la position des capteurs extérieurs Est, Sud, Nord et varangue Sud et le rôle de leur environnement (exposition solaire, végétation, milieu minéral) © auteur

4.4 Etude par caméra thermique

Ces images ont été prises par une caméra thermique durant la journée du 17 Avril à 14h00. Elles permettent d'avoir une vision comparative des températures avec toutefois des risques de dérives liées à la réflexion liée au contexte ambiant.

4.4.1 Chambre Ouest

Pour la chambre Ouest la source principale de chaleur est la porte donnant sur l'extérieur (voir Figure 2- 25)

Photos thermiques Photos des lieux

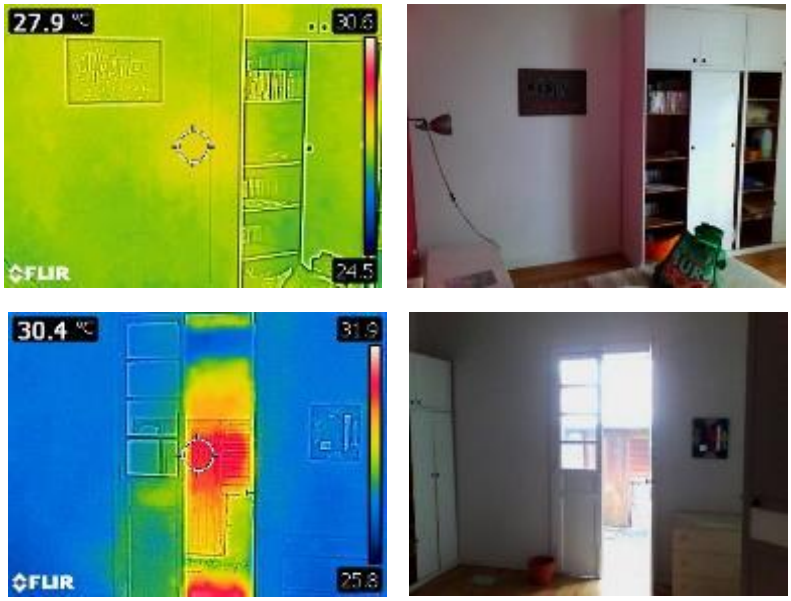


Figure 2- 25: Images thermiques chambre Est (à gauche) - photo des lieux (à droite)

4.4.2 Chambre Est

Pour la chambre Est (voir Figure 2- 26) la source de chaleur principale est la porte donnant sur l'extérieur.
L'image thermique montre des rayonnements solaires moins présents dans la chambre Est, ceci explique les températures plus fraiches relevées dans cette pièce, tel que décrit dans la partie « confort des différents espaces ».

Photos thermiques Photos des lieux

Figure 2- 26: Images thermiques chambre Est (à gauche) - photo des lieux (à droite)

4.4.3 Charpente

Les images thermiques ci-dessous (voir Figure 2- 27), montrent des ponts thermiques et des défauts dans l'isolation de la toiture en partie haute. Ces apports entrainent les élévations de températures relevées par le capteur positionné à l'intérieur centre sur la charpente.

Photos thermiques Photos des lieux

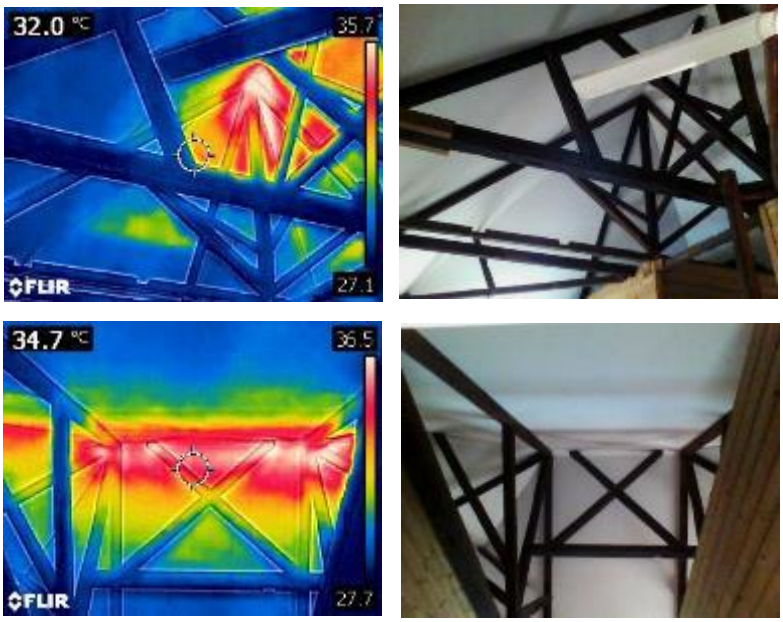


Figure 2- 27: Images thermiques charpente (à gauche) - photo des lieux (à droite)

4.4.4 Façade Sud

Comme il a été dit précédemment, la façade Sud est protégée des rayonnements solaires par la terrasse. Cela explique les apports de chaleur qui sont minimes de cette façade (voir Figure 2- 28). Cependant, la toiture en tôle de cette terrasse reçoit un apport de chaleur important.

Photos thermiques Photos des lieux

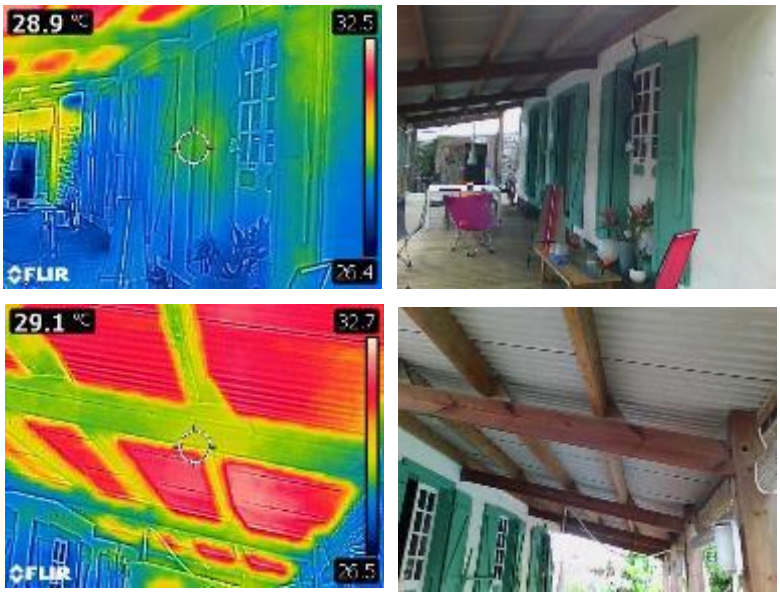
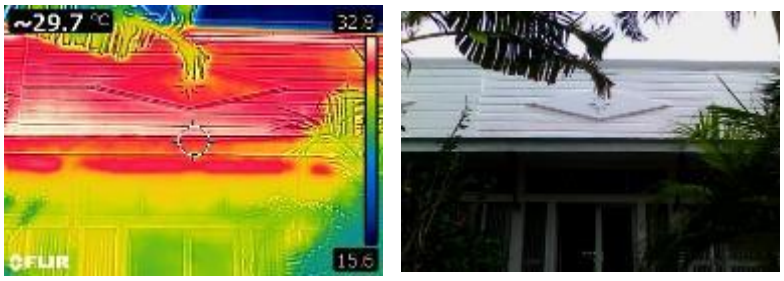


Figure 2- 28: Images thermiques façade Sud (à gauche) - photo des lieux (à droite)

4.4.5 Façade Nord

Les images thermiques ci-dessous (voir Figure 2- 29) montrent des apports de chaleur importante au niveau de la toiture et du sol. Ces apports de chaleurs sur la toiture sont dus aux rayonnements solaires. Il en est de même pour le sol. En effet, le sol est recouvert de gravillon qui a un Albédo faible. Ce qui signifie qu'il absorbe les rayonnements solaires et produit une source de chaleur. Les baies de cette façade sont protégées par le léger débord de la toiture.

Photos thermiques Photos des lieux



Photos thermiques Photos des lieux

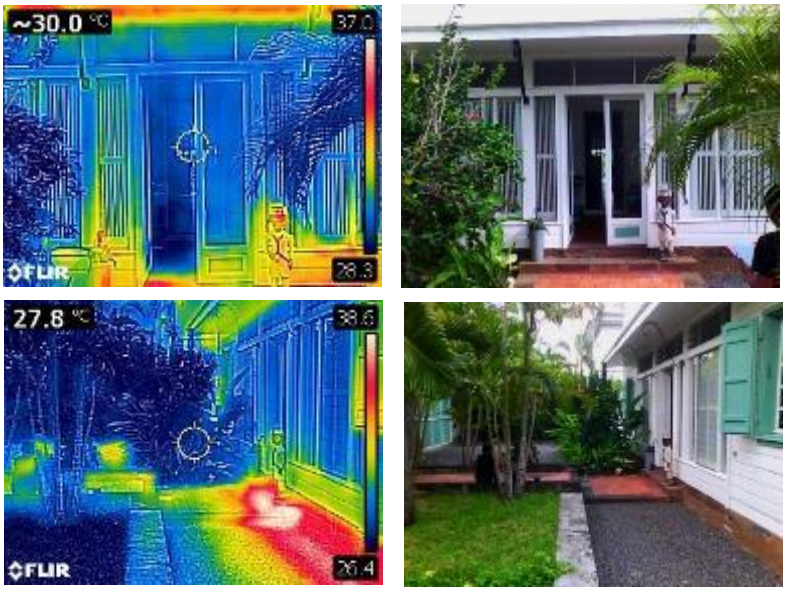


Figure 2- 29: Images thermiques façade Nord (à gauche) - photo des lieux (à droite)

4.4.6 Façade Est

Les images thermiques de la façade Est (voir Figure 2- 30), montrent une façade particulièrement chaude avec des températures allant de 28°C à 30°C. Ces températures élevées sont dues à son orientation qui génère une accumulation du rayonnement solaire dès

Photos thermiques Photos des lieux

Figure 2- 30: Images thermiques façade Est (à gauche) - photo des lieux (à droite)

le matin.

4.4.7 Façade Ouest

La façade Ouest, selon les images thermiques ci-dessous (voir Figure 2- 31), montre des températures du même ordre que celles de la façade Est (voir Figure 2- 30). Les points chauds de la façade Ouest restent ponctuels contrairement à la façade Est. Dans ce cas les parties avec des températures sont élevées sont la toiture, les casquettes et les volets battants des portes. Ces volets battants accumulent une chaleur plus importante que celle de la façade du

Photos thermiques Photos des lieux

Figure 2- 31: Images thermiques façade Ouest (à gauche) - photo des lieux (à droite)

fait de leur couleur vert foncé.

4.4.8 Bâtiments avoisinants

Bâtiment Est

Le bâtiment voisin qui se situe à l'Est de la maison montre des températures élevées (voir Figure 2- 32). La température de la façade peut atteindre 37.4°C. Ce bâtiment est une source d'apport de chaleur pour l'Est de la maison. Cela peut expliquer les chaleurs importantes relevées sur toute la façade Est sur les images thermiques.

Photos thermiques Photos des lieux

Figure 2- 32: Images thermiques bâtiment voisin Est (à gauche) - photo des lieux (à droite)

Bâtiment Ouest

Le bâtiment voisin Ouest a des températures moins importantes que celles du bâtiment voisin Est. En effet, la température maximale atteinte par ce bâtiment est de 29.8°C (voir Figure 2-33). Ce bâtiment surplombe la cuisine. Il peut donc être une source de chaleur pour la cuisine.

Photos thermiques Photos des lieux

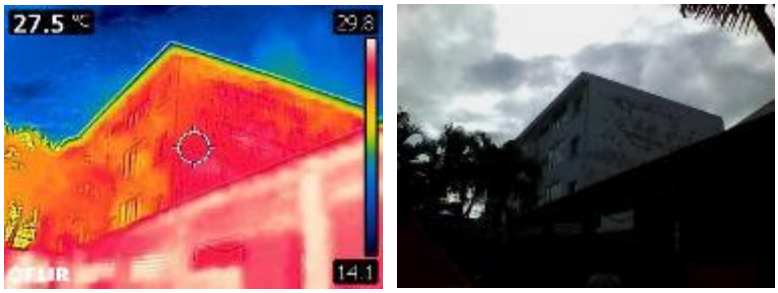


Figure 2- 33: Images thermiques bâtiment voisin Ouest (à gauche) - photo des lieux (à droite)

Cuisine

Comme le montre les images thermiques ci-dessus, la façade de la cuisine peut atteindre des températures de 30,3°C (voir Figure 2- 34). Etant face à la façade Ouest, elle est source de chaleur pour la façade Ouest par rayonnement.

Photos thermiques Photos des lieux

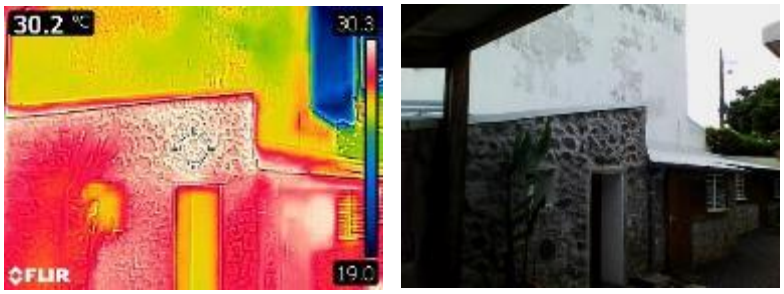


Figure 2- 34: Images thermiques cuisine (à gauche) - photo des lieux (à droite)

Ces différents clichés thermiques montrent que :

Les matériaux, l'exposition de l'élément considéré et l'environnement de la maison influencent directement les températures constatées et le potentiel de confort en découlant.

5 Conclusion

Les mesures menées pendant une saison chaude montrent que l'on peut atteindre un pourcentage de confort 95% du temps pendant cette période pour une maison traditionnelle représentative, située en centre-ville de Saint Pierre.

Ceci est possible grâce au concept général de la maison et aux usages à savoir :

- Un environnement végétal ;
- La présence de varangues faisant office d'espaces tampons (une varangue ouverte au Sud et une fermée au Nord) ;
- La ventilation traversante Nord/Sud ;
- Une porosité adaptée (d'environ 20%) ;
- Le choix de matériaux peu émissifs (bois) ;
- La gestion des ouvrants par les usagers ;
- L'utilisation de brasseurs d'air les jours sans vent.

La pièce la plus confortable est celle qui offre le meilleur potentiel de ventilation traversante : le séjour.

Certaines améliorations pourraient être apportées :

- Une meilleure isolation des combles et de la toiture de la varangue Sud ;
- Une amélioration de la protection de la façade Est (auvent, végétation des abords) ;
- Une meilleure ventilation et de la protection solaire de la varangue fermée au Nord.

La mise en place d'anémomètres aurait pu permettre d'affiner la compréhension le fonctionnement en ventilation naturelle, le caractériser et évaluer les débits et taux de renouvellement d'air. La maison étant occupée pendant la période de mesure celà n'a pu être fait.

Une case traditionnelle réunionnaise en centre-ville permet d'assurer le confort de ses habitants tout au long de l'année de manière passive ou semi passive (avec l'usage des brasseurs d'air). A ce titre on peut qualifier cette maison de bioclimatique semi passive.

Il apparait important de souligner l'apport évident de l'environnement planté de la maison ce qui n'apparait pas de manière récurrente dans les archétypes étudiés par ailleurs. Le végétal comme élément d'amélioration du confort en milieu tropical serait-il une voie à explorer ? C'est sans aucun doute un secteur d'investigation qui apparait comme complémentaire à celui de l'usage de la ventilation naturelle mis en évidence dans l'étude de cet exemple.

On ne peut généraliser à toutes les cases créoles mais supposer que des dispositions architecturales similaires amèneraient à des résultats comparables. La représentativité de cette maison réunionnaise permet d'envisager que cette typologie traditionnelle soit adaptée au contexte climatique et géographique de l'île de La Réunion.

Au-delà de cet exemple il est raisonnable de considérer que sous ce climat on peut atteindre un confort acceptable sans climatisation en respectant quelques principes compris par nos prédécesseurs. Saurons-nous transposer ces concepts et leurs résultats dans des programmes contemporains ? C'est ce que nous allons étudier dans le chapitre 3.

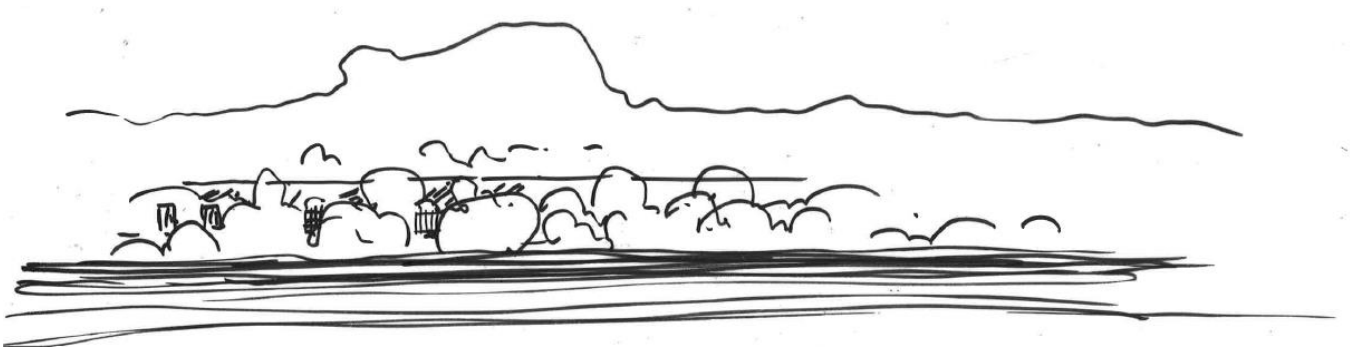
6 Bibliographie

(Bay, 2001)	Bay, J.-H., 2001. Cognitive biases in design: the case of tropical architecture. Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde, Delft.
(Beccali et al., 2018)	Beccali, M., Strazzeri, V., Germanà, M.L., Melluso, V., Galatioto, A., 2018. Vernacular and bioclimatic architecture and indoor thermal comfort implications in hot-humid climates: An overview. Renew. Sustain. Energy Rev. 82, 1726–1736. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.062
(Chandel et al., 2016).	Beccali, M., Strazzeri, V., Germanà, M.L., Melluso, V., Galatioto, A., 2018. Vernacular and bioclimatic architecture and indoor thermal comfort implications in hot-humid climates: An overview. Renew. Sustain. Energy Rev. 82, 1726–1736. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.062
(Dear et al., 2013)	Dear, R.J. de, Akimoto, T., Arens, E.A., Brager, G., Candido, C., Cheong, K.W.D., Li, B., Nishihara, N., Sekhar, S.C., Tanabe, S., Toftum, J., Zhang, H., Zhu, Y., 2013. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. Indoor Air 23, 442–461. https://doi.org/10.1111/ina.12046
(Egon, 1983)	Egon, J.P., 1983. Connaissance de l'architecture réunionnaise.pdf.
(F Picgirard - J Gandemer, 2012)	*F Picgirard - J Gandemer, 2012. La ventilation naturelle en pratique. Guide pratique ADEME*
(Garde et al., 2004)	Garde, F., Adelard, L., Boyer, H., Rat, C., 2004. Implementation and experimental survey of passive design specifications used in new low-cost housing under tropical climates. Energy Build. 36, 353–366. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.045
(Hyde and Docherty, 1997)	Hyde, R., Docherty, M., 1997a. Thermal Performance of Housing in the Hot-Humid Tropics of Australia. Archit. Sci. Rev. 40, 105–112. https://doi.org/10.1080/00038628.1997.9697391
(Hyde et al., 2016)	Hyde, R., Upadhyay, A.K., Treviño, A., 2016. Bioclimatic responsiveness of La Casa de Luis Barragán, Mexico City, Mexico. Archit. Sci. Rev. 59, 91–101. https://doi.org/10.1080/00038628.2015.1094389
(Lenoir, 2105)	Lenoir, A., 2105. On Comfort in Tropical Climates. The Design and Operation of Net Zero Energy Buildings. 236.
(Leveneur, 2007)	*Leveneur, B., 2007. Petites histoires de l'architecture réunionnaise : de la Compagnie des Indes aux années 1960. 4 épices éditions, Sainte-Clotilde, Réunion.*
(Lucas et al., 2002)	Lucas, F., Adelard, L., Garde, F., Boyer, H., 2002. Study of moisture in buildings for hot humid climates. Energy Build. 34, 345–355. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00115-3
(Prianto and Depecker, 2003)	Prianto, E., Depecker, P., 2003. Optimization of architectural design elements in tropical humid region with thermal comfort approach. Energy Build. 35, 273–280. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00089-0
(Rivière Noyre, 1980)	Rivière Noyre, J., 1980. L'habitat Réunionnais.

(Szokolay, 1986).	Szokolay, S.V., 1986. Climate analysis based on the psychrometric chart. Int. J. Ambient Energy 7, 171–182. https://doi.org/10.1080/01430750.1986.9675499
(Toe and Kubota, 2015)	Toe, D.H.C., Kubota, T., 2015. Comparative assessment of vernacular passive cooling techniques for improving indoor thermal comfort of modern terraced houses in hot–humid climate of Malaysia. Sol. Energy 114, 229–258. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.035
(Vaisse and Barat, 1988)	Vaisse, C., Barat, C., 1988. Cases cachées : les maisons de la Réunion. Ed. du Pacifique, Singapour.

Chapitre 3

Comment transposer les principes de l'architecture traditionnelle dans des projets contemporains ?



Croquis d'étude préliminaire- collège Bouéni © 2APMR – Antoine Perrau Architectures

Nous allons, dans ce chapitre, voir comment certains des concepts de l'architecture pré moderne, vernaculaire, coloniale, en milieu tropical humide peuvent être transposés, avec quels outils et évaluer le niveau de confort atteint. Pour cela nous analyserons deux études de cas, de la production de notre agence, dans des contextes différents; l'Ilet du Centre à La Réunion et le collège Bouéni à Mayotte et nous expliciterons leur méthodologie de transcription, de conception et avec quels outils.

Table des matières

1 Introduction 125
2 Revue de littérature 126
2.1 L'expérience vécue 126
2.2 La règle du pouce 126
2.3 Les recommandations ECODOM 126
2.4 L'outil PERENE 126
2.5 L'approche environnementale multicritère 127
2.6 Les outils de simulation STD (Simulations Thermiques Dynamiques) 127
2.7 L'étude en soufflerie numérique ou physique 127
2.8 L'évolution des usages des outils de conception 129
3 Méthodologie 130
3.1 Description des process utilisés pour les deux études de cas 130
3.2 Comparaison des deux process 132
4 Résultats 134
4.1 Etude de cas l'Ilet du Centre 134
4.2 Etude de cas le Collège de Bouéni 151
4.3 Evaluation comparative des concepts architecturaux des deux études de cas 171
5 Conclusion 172
6 Bibliographie 173

1 Introduction

Les chapitres 1 et 2 nous ont montré comment des architectures pré modernes, vernaculaires et coloniales, que nous appelons traditionnelles, avaient su s'adapter au contexte pour assurer le confort de leurs usagers et cela avant l'utilisation des systèmes actifs énergivores.
Ces solutions d'adaptation identifiées dans les chapitres précédents peuvent être résumées par :

- Un contexte favorable :
  - Environnement végétal et peu dense;
  - Albédo favorable.

- Des adaptations architecturales ;
  - Organisation intérieure traversante ;
  - Bonne porosité des façades (supérieure à 20%) ;
  - Protection solaire de l'enveloppe ;
  - Création de la varangue (sur un ou plusieurs côtés) ;
  - Choix de matériaux peu émissifs.

Il apparait aujourd'hui difficile, voire impossible, compte tenu du changement de contexte économique (nécessité de densification), technique (nouveaux matériaux et procédés constructifs), de reproduire ces exemples de manière littérales, quelles qu'en soient leurs qualités.
Nous allons dans ce chapitre voir si il est envisageable de transposer ces concepts d'architecture passive dans des programmes et contraintes contemporains au travers de l'analyse de deux études de cas issus de notre production à des périodes différentes:

- L'ilet du centre à La Réunion conçu en 2005 ;
- Le collège Bouéni à Mayotte conçu en 2013.

Au travers de ces deux exemples et de ces approches qualitatives et quantitatives, nous tenterons d'expliciter des méthodologies adaptées à des contextes climatiques, géographiques et de typologies différents et en montrer leurs limites.
Nous allons donc, dans ce chapitre, montrer, dans notre travail d'architecte, comment notre processus de conception a évolué et les apports de ces évolutions dans des contextes climatiques, de site et de programme différents.
La question posée est de voir s'il est possible de proposer une ou plusieurs façons de faire, reproductibles, pédagogiques, (processus de conception) en fonction de quel contexte, permettant de perpétuer certains acquis traditionnels dans des projets contemporains ?

2 Revue de littérature

Notre travail a trouvé sa genèse dans une tentative de faire évoluer, par notre pratique professionnelle, l'architecture traditionnelle locale dans notre parcours d'architecte implanté à La Réunion depuis les années 1990. Durant ces 25 années, notre expérience et les outils de conception ont changé.
Nous allons exposer les approches et outils utilisés dans deux projets, conçus à des dates et contextes différents.

2.1 L'expérience vécue

Il est important de noter que l'ilet du Centre, conçu par Michel Reynaud et moi-même (pour la partie bureaux) est le fruit d'une vingtaine d'année d'expérience professionnelle. Il ne s'agit pas ici d'une première œuvre, mais d'un projet mature, emblématique et démonstratif puisqu'il s'agit de nos locaux professionnels dans lesquels nous avons voulu montrer qu'il était possible de fonctionner en confort sans climatisation artificielle. L'expérience vécue et accumulée n'est pas quantifiable bien qu'elle soit un facteur d'optimisation conceptuelle évidente.

2.2 La règle du pouce

La règle du pouce, qui par définition est une forme d'approche non quantifiée ou grossièrement, a ici été appliquée pour une conception semi-passive comme la définit Kean Yeung dans (Bay et Ong 2006), c'est-à-dire, sans le recours à des systèmes actifs pour le confort thermique (à l'exception de brasseurs d'air). On trouve cette règle du pouce dans les architectures vernaculaires, conçues sans architecte mais avec la transmission de savoir et d'expérience.(Weber et Yannas 2014),(GhaffarianHoseini et al. 2014).

2.3 Les recommandations ECODOM

Les recommandations ECODOM sont issues d'une étude (Garde, Boyer, et Celaire 2000).visant à définir des moyens de maitrise des apports de chaleur, de ventilation ou de climatisation performante, de fourniture d'eau chaude solaire et d'éclairage performant de manière à optimiser les dépenses énergétiques dans les logements à La Réunion et en Guyane. Elles avaient pour objectif de donner des règles simples de conception pour les logements neufs dans les DOM (Guadeloupe, Martinique, Guyane et Bas de La Réunion). Elles portaient sur la ventilation naturelle et les protections solaires. Elles ont pour la première fois précisé des règles de ventilation naturelle en fixant des niveaux de porosité minimale de 25% et que le caractère traversant était abordé. Ces recommandations ont montré leur efficience dans des contextes programmatiques simples (logements) (Garde et Adelard 2004).

2.4 L'outil PERENE

L'outil PERENE est issu d'une étude et dans le prolongement des recommandations ECODOM, élargies au tertiaire en fonction d' un zonage climatique précis à l'ile de La Réunion. *« Il définit les exigences en termes de facteur solaire, de porosité, etc. »* (ADEME 2010) En annexe des explications sur l'ensemble des exigences sont précisées et illustrées par *« des*

exemples, des solutions techniques, les définitions des termes utilisés et la méthodologie, notamment en ce qui concerne les protections solaires des baies et des ouvertures ». Cet outil précise le premier document édité en 2OO4 avec des modifications et des ajouts, notamment au niveau du zonage climatique avec la définition de 4 zones géographiques, des exigences et de la méthode de calcul des porosités, de la redéfinition des valeurs de coefficients d'ensoleillement, de la mise en place systématique de brasseurs d'air, de la réduction de la puissance des systèmes de production de froid, de la production exclusivement solaire de l'eau chaude sanitaire*. « L'objectif de PERENE est de concevoir des bâtiments et des logements qui soient confortables (en été comme en hiver) tout en étant le plus économes possible sur le plan énergétique».*

2.5 L'approche environnementale multicritère

Cette approche par recommandations, observations et transpositions puise ses racines dans le travail précurseur de Victor Olyay (Olgyay et al. 2015) initialement édité en 1963 . Elle est le fruit du travail d'autres prédécesseurs illustres, Fry et Drew (Fry et Drew 1974), (Givoni 1994) qui ont été initiateurs de cette approche bioclimatique sensible, sur des bases scientifiques . Elle a été étudiée pour le climat du Bengladesh, lui aussi chaud et humide (Mallick 1996), en Australie (Hyde 1996). Elle l'a encore été dans l'approche du régionalisme critique, c'est-à-dire en puisant son inspiration dans la compréhension des architectures vernaculaire et la transposition contemporaine (Tzonis, Stagno, et Lefaivre 2001). Elle s'est faite à l'opposé du modernisme, omnipotent grâce aux systèmes actifs. Ce travail a fait l'objet d'un ouvrage exhaustif, précisant cette approche sensible, sur la base de la compréhension du climat (Liébard et Herde 2005) ou encore pour l'Afrique de l'Est, sur la base de l'analyse de diagrammes de confort de Givoni (Butera, Adhikari, et Aste 2014) et par ailleurs (Garde et Adelard 2004) à La Réunion.

2.6 Les outils de simulation STD (Simulations Thermiques Dynamiques)

Il s'agit d'outils informatiques (Energy+, DesignBuilder,TRNsys…) prédictifs du comportement thermique d'un bâtiment en fonction de ses caractéristiques propres. Ils servent d'aide à la décision. Cette approche numérique en milieu tropical a par exemple été conduite par (Prianto et Depecker 2003) dans le cadre d'une étude de l'impact de différents paramètres, type d'ouverture, organisation du cloisonnement intérieur ou encore cet outil a été utilisé pour étudier les maisons traditionnelles Vietnamienne (Anh-Tuan et al. 2011) . Ils ont aussi été utilisés dans l'analyse de la ventilation extérieure dans une zone urbaine hétérogène compacte (Nestoras et al. 2017) ou encore par Hirano (Hirano et al. 2006) pour l'étude d'un modèle de bâtiment résidentiel poreux en milieu tropical humide. Ils sont aujourd'hui d'usage courant dans ce domaine.

2.7 L'étude en soufflerie numérique ou physique

Ce type d'étude permet une approche quantifiée des débits d'air interne, marqueurs du potentiel de vitesse d'air et donc du potentiel de confort d'un bâtiment. Elle se base sur l'élaboration d'une maquette physique ou numérique et de son environnement proche, puis de l'étude des champs de pression moteurs générés sur cette maquette, et enfin de la

quantification des vitesses d'air dans les locaux donnant des taux de renouvellement d'air créés. Cette méthode a été utilisée pour évaluer le potentiel de ventilation naturelle en climat méditerranéen avec des outils numériques (Faggianelli 2014) ou avec une soufflerie physique aux Antilles (Dupont, Celestine, et Feuillard 1994). Ces études sont basées sur une théorisation éprouvée, entre autres en France par (Gandemer et Guyot 1976), (Ghiaus et Allard 2005),et ailleurs, (Jiang et al. 2003), du Wind engineering.
Elle permet d'obtenir des données d'entrée, vitesse d'air dans les locaux étudiés, des delta Cp sur les façades, et des débits plus réalistes que les Eurocodes de simulation en prenant en compte un environnement complexe. En effet les modèles en pression utilisent, entre autres, les données climatiques météo du vent pour définir des Cp et des hypothèses de taux de renouvellement d'air qui ne reflètent pas toujours la situation réelle du bâtiment étudié (relief, effet de masque, organisation non débitante du plan ...). La simulation physique permet, elle, d'obtenir des vitesses réalistes que l'on peut alors utiliser comme donnée d'entrée pour les STD et obtenir des résultats plus représentatifs.

2.8 L'évolution des usages des outils de conception

Les outils de conception ont donc évolué dans le temps. Dans un contexte urbain dense ou une architecte complexe (voir Figure 3- 1) effets de masques, formes non simples) les outils, règle du pouce, ECODOM ou PERENE ont montré leurs limites.

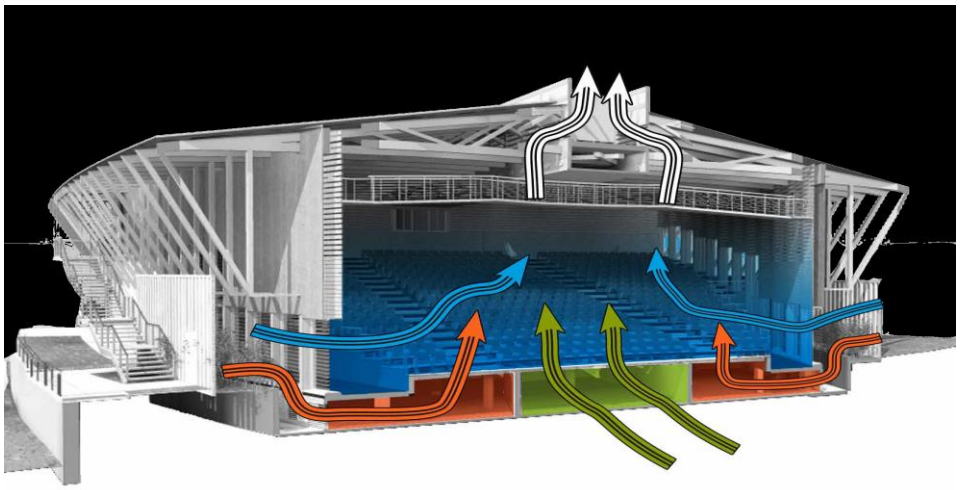


Figure 3- 1: Amphithéâtre bioclimatique du Moufia © O. Brabant architecte – J Gandemer

On est passé de l'utilisation de principes de conception à l'utilisation d'outils prédictifs (STD et étude en soufflerie) permettant d'optimiser les concepts envisagés.
La soufflerie physique est utilisée depuis les années 2010 par exemple pour l'amphithéâtre bioclimatique du Moufia (Payet M. et al. 2019), à La Réunion pour prendre en compte des contextes spécifiques plus complexes (effets de masque, formes architecturales complexes, climat contraignant).
Il est donc important de voir comment et quand ils sont utilisés.
Il est par exemple inutile d'envisager de faire des STD (Simulations Thermiques Dynamiques) au stade de l'esquisse comme c'est explicité dans le guide ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France) 2007) alors que l'architecture du projet n'est pas encore suffisamment figée.
Mais pour autant, faut-il systématiquement utiliser les outils prédictifs, ou les règles de base peuvent-elles suffirent et dans quel contexte ?
Le présent chapitre se propose donc d'étudier, d'évaluer, à travers de ces deux études de cas, les outils utilisés, leur contexte d'utilisation, l'efficience de ces dispositifs, d'en tirer des enseignements, voir si une transposition est envisageable et dans quelle condition pour d'autres projets comparables.

3 Méthodologie

3.1 Description des process utilisés pour les deux études de cas

Nous allons expliciter la méthodologie de conception utilisée pour ces outils.
Première approche : l'Ilet du Centre (2005)

- Outils disponibles : Notre expérience vécue, la « règle du pouce » pour une approche passive, le référentiel ECODOM.

Seconde approche : Le collège de Bouéni (2013)

- Outils disponibles : Notre expérience, la « règle du pouce », le référentiel PERENE, l'approche environnementale multicritères, l'ingénierie aéroclimatique, la soufflerie physique à couches limite, les outils de simulations STD.

Nous avons, avec l'expérience, affiné l'utilisation de ces outils et leur chronologie d'usage. Les Figure 3- 2 et Figure 3- 3 détaillent ces différentes évolutions et les outils utilisés pour chaque cas étudié.

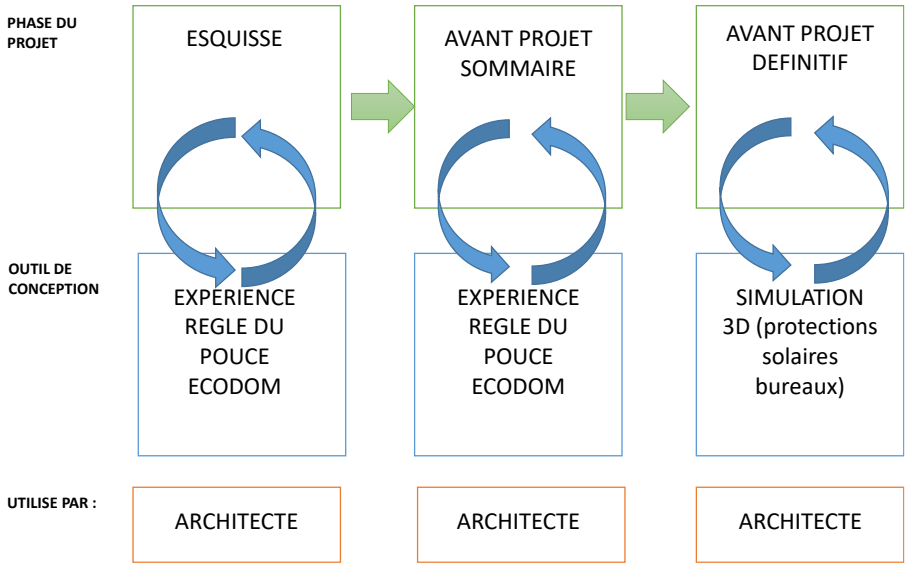


Figure 3- 2: Organisation des études et outils utilisés pour l'Ilet du Centre en 2005

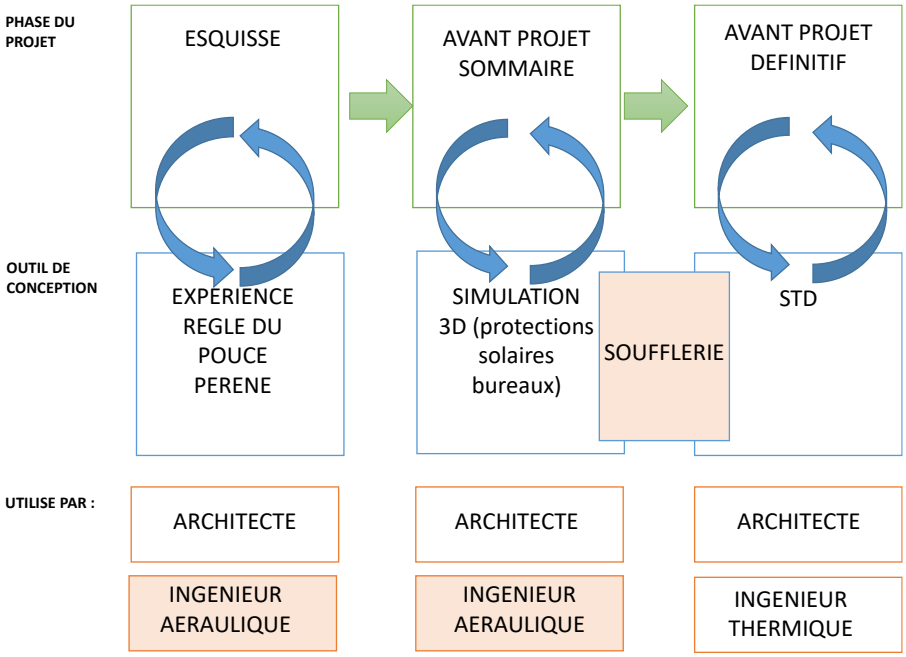


Figure 3- 3: Organisation des études et outils utilisés pour le collège Bouéni en 2013

3.2 Comparaison des deux process

L'approche utilisée pour l'Ilet du Centre, en l'absence d'outil prédictifs et d'apport d'une expertise externe, n'a pas permis de tester plusieurs hypothèse de travail, à l'inverse du Collège de Bouéni. C'est l'utilisation des outils, expérience vécue, règle du pouce et référentiel ECODOM, qui ont permis de finaliser la conception.
Nous allons donc comparer différents contextes en les objectivant (voir Tableau 3- 1 et Tableau 3- 2).

3.2.1 Contexte climatique :

Sur la base des diagrammes de Givoni, nous pouvons déterminer un pourcentage de temps ou l'on est en confort en intégrant les différentes vitesses de vent dans les conditions extérieures sur la base des données météo de la station la plus proche du site. Il est de 99% du temps pour l'ilet du Centre (voir Figure 2-4) et 97% pour le collège.
Le potentiel de confort peut donc être qualifié de favorable dans les deux cas.

3.2.2 Contexte aéraulique :

Nous nous sommes basés ici sur les études de Jacques Gandemer et en particulier son guide de la ventilation naturelle en pratique (F Picgirard - J Gandemer 2012) et qui précise : *« Pour l'ensemble des directions des vents dominants, si la vitesse moyenne sur le site, à environ 10 m de hauteur, est supérieure ou dépasse 2.5 m/o pendant 50 % du temps annuel, alors le site permettra de développer une ventilation naturelle efficace. ».*
Sur cette base, nous avons considéré que le potentiel de ventilation naturelle pouvait être qualifié de favorable dans les deux cas. Les roses des vents, voir Figures 2-1 pour Ilet du Centre et 3-24 pour Bouéni.

3.2.3 Contexte de site :

L'objectif est ici de considérer si il existe dans le contexte topographique (colline, montagne) ou de l'environnement proche (bâtiment), au vent dominant du site, des facteurs risquant de dégrader le potentiel de vent initial.
Pour l'ilet du Centre, le contexte urbain et donc d'un environnement bâti est défavorable.
Pour le Collège de Bouéni, la présence d'une colline dégrade aussi le potentiel pour les vents de Nord-Ouest.
Sur cette base, nous avons considéré que le site était défavorable dans les deux cas.

3.2.4 Contexte programmatique :

Nous l'avons évoqué dans l'introduction, les programmes ont évolué, il ne s'agit plus ici de maison individuelle isolée, introduisant une complexité supplémentaire.
D'une manière générale, le logement collectif ne constitue pas un programme complexe.
Un équipement tertiaire comme un collège présente lui des contraints fonctionnelles et de proximité d'éléments programmatiques (entrée, administration, surveillance…) induisant des formes et des groupes de bâtiments plus imbriquées et complexes.
Sur cette base le programme a été évalué de simple pour l'Ilet du Centre et complexe pour le collège de Bouéni.

Tableau 3- 2: Tableau de choix des outils en fonction des contextes – Collège Bouéni

COLLEGE BOUENI	Favorable ou simple	Défavorable ou complexe	Outils utilisés
Contexte climat	Tropical humide 97% confort		Expérience vécue, Règle du pouce, Outil PERENE, Étude en soufflerie, STD
Contexte vent	50% sup. à 2,5 m/s Période chaude		
Contexte site		Environnement naturel boisé, avec masque relief	
Contexte programme		Equipement multi fonctions	

Tableau 3- 1: Tableau de choix des outils en fonction des contextes – Ilet du Centre

ILET DU CENTRE	Favorable ou simple	Défavorable ou complexe	Outils utilisés
Contexte climat	Tropical humide 99% confort		Expérience vécue, Règle du pouce, Référentiel ECODOM
Contexte vent	50% sup. à 2,5 m/s Période chaude		
Contexte site		Environnement urbain, avec masques	
Contexte programme	Logements , bureaux simples		

Au-delà de cette comparaison, il convient d'examiner avec plus de détails ces deux projets pour en détailler les concepts et en évaluer la validité.

4 Résultats

4.1 Etude de cas l'Ilet du Centre

4.1.1 Contexte

4.1.1.1 Contexte urbain

L'ilet du centre (conception 2005, livraison 2008) est positionné en bordure du centre-ville de Saint Pierre, ile de La Réunion. La conception architecturale a été faite par Michel Reynaud, 2APMR en collaboration avec Antoine perrau architectures (pour les bureaux). Ce projet a été lauréat du prix 2009-2010 « habitat solaire habitat d'aujourd'hui » catégorie logement outre-mer organisé par Observ'er.

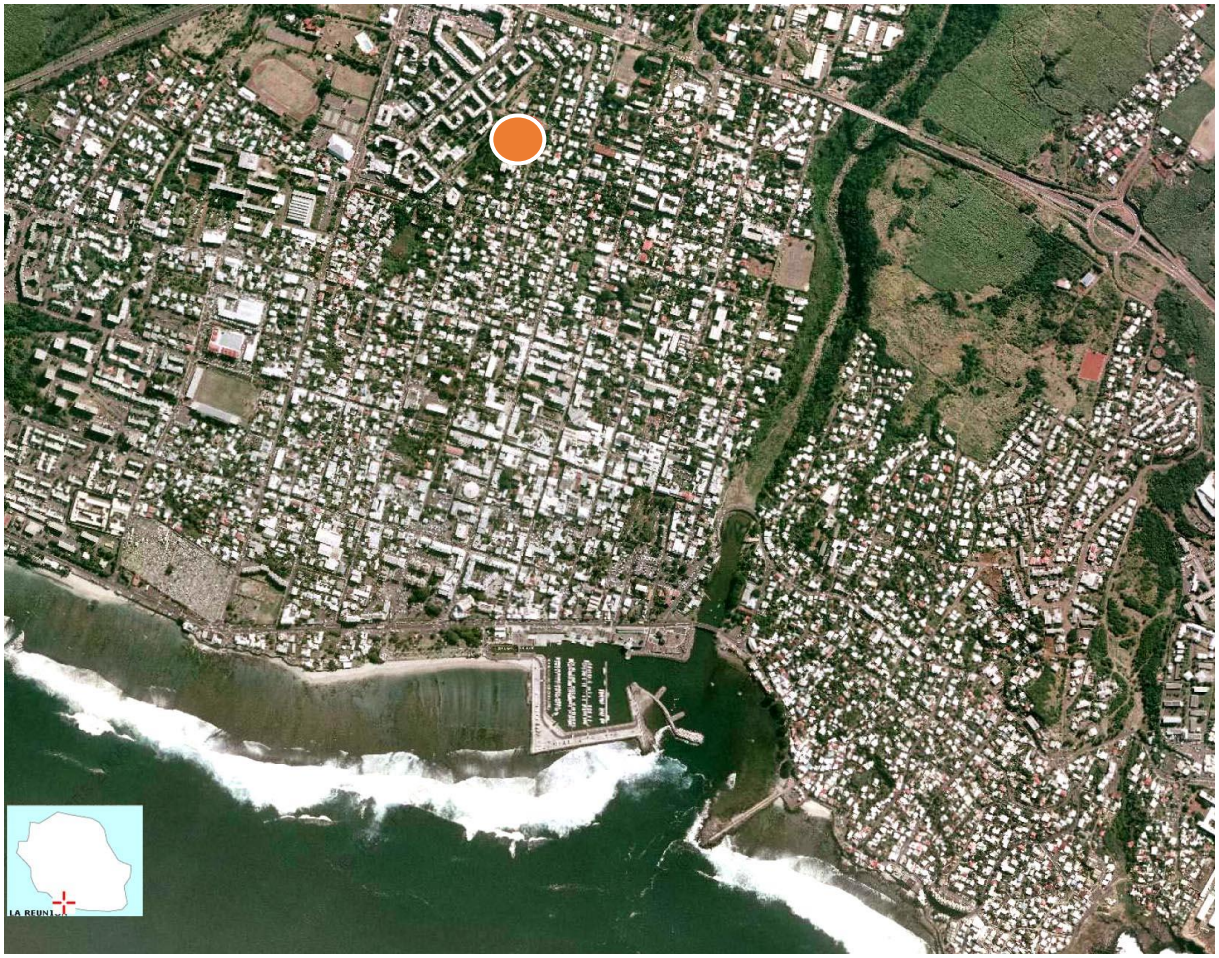


Figure 3- 4: Localisation de l'Ilet du Centre à Saint Pierre, La Réunion, vue aérienne © Google Earth

Comme on peut le constater sur la Figure 3- 4, le projet est situé en limite de la trame Hipodamienne historique de la ville coloniale de Saint Pierre. Il est situé dans un contexte urbain en mutation, constitué d'une typologie variée, allant de la maison individuelle à des ensembles de logements à R+4, R+5.

Le terrain de 4123m² était initialement occupé par une pépinière, l'extension de la ville a progressivement phagocyté cette emprise foncière et a favorisé sa mutation au regard de l'opportunité qu'elle présentait. La sensibilité environnementale du propriétaire et ses possibilités financières limitées ont permis d'envisager un projet différent en ce sens que la

sur-densification au maximum des possibilités offertes par le règlement d'urbanisme n'était pas un fin en soi. La philosophie du projet, exprimée dans son appellation, en a donc découlé. Pour mémoire, un ilet est un groupement d'habitat vernaculaire dans les Hauts de l'île.
Il s'agissait d'avoir une réflexion environnementale et bio climatique adaptée au programme et de proposer une alternative aux projets de défiscalisation de promoteurs faisant flores à cette période ou la seule rentabilité financière à court terme était recherchée.

4.1.1.2 Contexte climatique

Localisation : 21°20'4.25"Sud 55°28'32.00"Est.
Le contexte climatique est identique à celui la maison Levieux décrit dans le chapitre 2, les deux projets étant dans la même ville à quelques centaines de mètres l'un de l'autre. Les vents dominants sont donc de Sud Est (Alizés réguliers été comme hiver).
Cette donnée utilisée lors de la conception initiale du projet présente cependant des lacunes ou pour le moins des réserves. Le site du projet est situé en secteur urbain et sous le vent d'une partie de la ville. Le potentiel initial de vent identifié à la station météo la plus proche, est donc altéré par la rugosité et la topographie du site. On peut donc imaginer, sans que cela ait été quantifié lors de l'étude initiale, une limite dans la précision de l'exploitation directe de la donnée vent. Ceci pose la question du recalage climatique de cette donnée qui sera abordée dans la deuxième partie de ce chapitre.
L'examen des données température, hygrométrie, de leurs transcriptions dans un diagramme de Givoni (voir Chapitre 2. 1.2), de l'analyse de la donnée vent en période chaude, nous a permis d'envisager la conception d'une architecture bioclimatique en ventilation naturelle de confort pour l'îlet du centre.

4.1.1.3 Contexte Programmatique

Le projet s'articule autour d'un programme classique de logements de « standing » en accession à la propriété. Il est constitué de :
66 logements (du T1 au T4) et 312 m² de bureaux et leurs parkings associés, répartis dans cinq bâtiments distincts réalisés en deux phases successives.

- Surface du terrain 4123m² ;
- Altitude : 75m NGR (Nivèlement Général de La Réunion);
- SHON (Surface Hors Œuvre Nette) : 4 123 m² ;
- COS (Coefficient d'Occupation du Sol) : 1, pour un COS maximal autorisé dans ce secteur par le PLU (Plan Local d'Urbanisme) de 1,5.

4.1.2 Concept général

A la lumière des intentions et désidératas exprimés par le maître d 'ouvrage, le projet s'est orienté vers une conception bioclimatique, optimisant des dispositifs passifs devant permettre de se passer de système de climatisation pour obtenir le confort dans les logements et les bureaux.

Une conception basée donc, entre autres, sur la ventilation naturelle de confort des locaux se définit comme une architecture passive Dès les premières esquisses d'intention (voir Figure 3- 5 et Figure 3- 6) on observe déjà les premières intentions de traitement de l'enveloppe, la végétation et le traitement différencié des bureaux.

Figure 3- 5: Croquis préliminaires de l'Ilet du Centre © M Reynaud

Il convient toutefois de rappeler ici que la ventilation naturelle en milieu tropical ne saurait se suffire à elle-même pour atteindre les objectifs de confort. Le recours à des systèmes actifs est indispensable dans certains cas extrêmes en saison chaude, il sera alors privilégié un système de brassage d'air, accompagné d'une décharge thermique et donc de l'ouverture des fenêtres, plutôt qu'une climatisation. On parlera alors d'architecture semi passive ou mode mixte selon la définition de Ken Yeang (Bay et Ong 2006) (Voir chapitre 1).

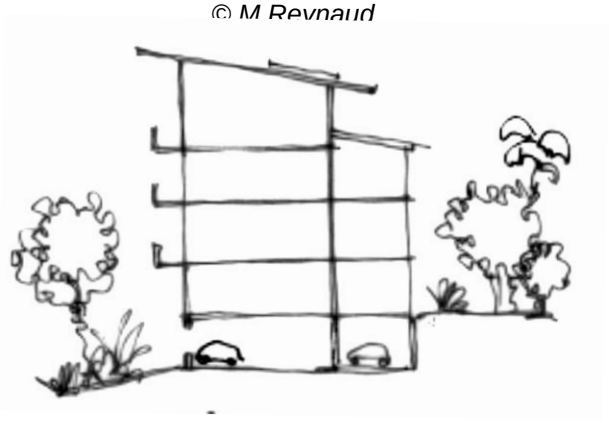


Figure 3- 6: Le concept de la varangue urbaine © Auteur

Comme le rappelle J Gandemer dans (F Picgirard - J Gandemer 2012), *« Une conception aéroclimatique performante nécessite :*

Une protection solaire performante
Un contrôle des charges thermiques internes
Une ventilation débitante, gérée et organisée
L'intégration des contraintes environnementales »

Il y explique aussi, en préalable, que cette conception suppose que le potentiel de ventilation du site ait été identifié après analyse.

C'est bien dans ce contexte et en respectant ces principes qu'a été conçu le projet. Il est important de souligner qu'il a été fait en optimisant les principes évoqués ci-dessus **sans outils de simulation spécifique**, mais en ayant recours à notre expérience, la règle du pouce ou des préconisations issues du référentiel du label ECODOM.

4.1.2.1 Un concept architectural novateur: la varangue urbaine.

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, un des points communs des architectures tropicales est la permanence de la véranda. Cet espace couvert, protégé des ardeurs du climat constitue un espace de transition entre l'intérieur et l'extérieur et au-delà un espace faisant office de tampon climatique (voir Figure 3- 9 et Figure 3- 8). Il joue donc un double rôle, social et thermique. A l'échelle du logement collectif il a été reproduit dans ce que l'on appelle à la Réunion, la varangue, il devient une sorte de balcon couvert, extension extérieure minimale du logement. Toutefois, à l'échelle du bâtiment lui-même cet espace n'existait plus et sa fonction sociale autant que climatique avait disparu. Cela revient à considérer que la « tropicalisation » du logement sous les tropiques français s'était arrêtée à la cellule. Les conséquences en ont été pour le moins funestes à l'échelle urbaine. En effet le « dogme » du respect de l'alignement urbain diffusé par les urbanistes formés à l'école Haussmannienne ou pour le moins Française, a généré une ville en U, minérale, avec les conséquences que l'on sait en termes de création d'ilot de chaleur. La rupture architecturale principale de ce projet consiste en une remise en question de cet alignement pour « réinventer » la varangue à l'échelle urbaine (voir Figure 3- 9) produire une typologie de bâtiment différente et en tirer profit. L'importance de cet espace de transition avait d'ailleurs très bien été comprise par Richard Neutra, influencé par Franck Lloyd Wright. On le retrouve symbolisé sur la Figure 3- 7. Il y est mentionné pour cet espace : « interior plus exterior » ici à l'échelle domestique de la maison individuelle. Notre proposition dans ce projet a été de la transposer à l'échelle collective et d'en étudier les effets.

Cette varangue urbaine démultiplie son efficacité en devenant productive grâce à

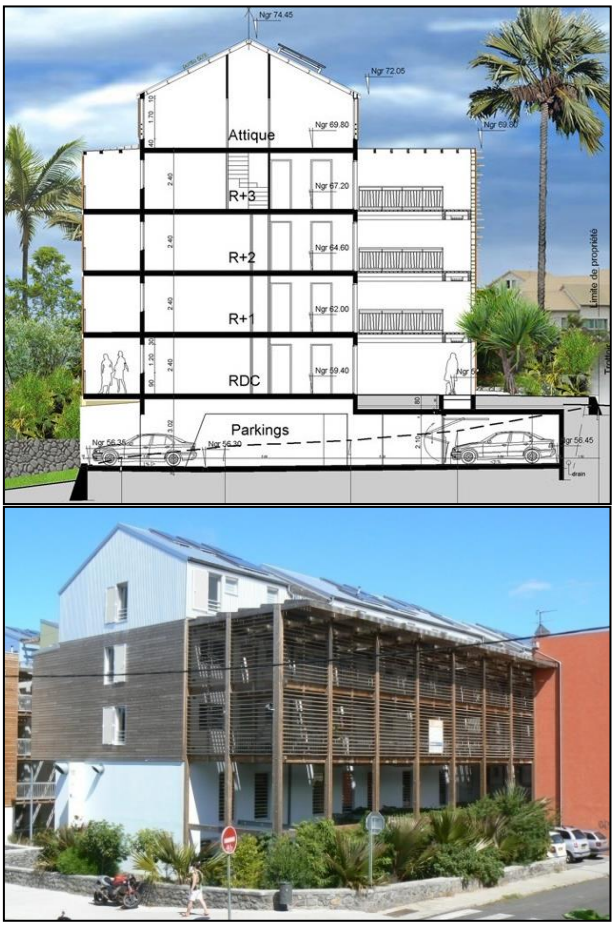


Figure 3- 9: Ilet du Centre coupe et photo (©

Figure 3- 8: Typologie des vérandas Calédoniennes – (© M.Pétron 1983)

Figure 3- 7: L'espace de transition Richard Neutra (© Fry and Drew 1974)

l'intégration de panneaux photovoltaïques en toiture ombrière. Elle a été la première ferme photovoltaïque intégrée architecturalement de La Réunion.

4.1.2.2 Une protection solaire performante

L'enveloppe bâtie a fait l'objet d'un traitement des protections solaires réduisant au maximum tout rayonnement direct sur les façades et donc ici, l'enveloppe béton. Au Sud Sud-Ouest on retrouve la varangue « classique » voir **1**, des logements et la coursive des bureaux (voir Figure 3- 10), au Nord-Nord-Est la varangue urbaine, voir **2**, abritant les circulations horizontales d'accès aux logements (voir Figure 3- 11). Le niveau sous comble est protégé par un bardage thermo réfléchissant constitué d'une tôle d'acier recouverte d'un film aluminium naturel réfléchissant.

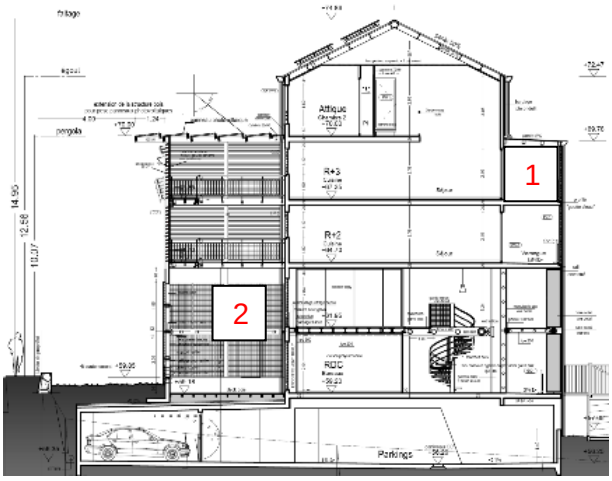


Figure 3- 10: Coupe Nord-Nord-Est / Sud-Sud-Ouest, Ilet du Centre (© auteur)

Les pignons sont bardés en position haute et protégés en partie basse par la végétation périphérique. Les apports solaires sont donc traités en totalité. Cet élément est caractérisé par le facteur solaire (voir annexe 2 Chapitre 3) Les apports thermiques extérieurs sont donc contrôlés.

Figure 3- 11: Façade Sud Sud Ouest bâtiment A – Ilet du centre - © H Douris

4.1.2.3 Une porosité optimisée

Le label ECODOM propose pour ce contexte une porosité moyenne de 25%.

Les bureaux ont une porosité de 23% en façade Sud-Sud-Ouest et 22% en façade Nord-Nord-Est (voir Figure 3-17). Le projet est donc un peu en deçà du label ECODOM mais se révèlera au-delà de PERENE (LPBS et IMAGEEN 2009), finalisé ultérieurement qui préconise 20% dans cette zone climatique.

La bonne répartition de cette porosité joue aussi bien sur un rôle important dans l'optimisation du potentiel et l'amélioration du confort ressenti en répartissant les flux d'équilibrage de manière la plus homogène possible dans les zones de vie.

4.1.2.4 Une orientation correcte

Le bâtiment étudié présente aussi une orientation qui a été définie par l'orientation de la rue, les règles d'urbanisme et l'optimisation de l'usage du sol. Il n'a donc pas été possible de l'optimiser. Toutefois, étant Nord-Nord-Est elle est proche d'un angle de 45 ° par rapport aux vents dominants de Sud Est (voir Figure 3- 12).Le potentiel de ventilation (voir chapitre 1) est donc en partie préservé par l'orientation du bâti.

Figure 3- 13: Vue aérienne, Ilet du Centre (© auteur)

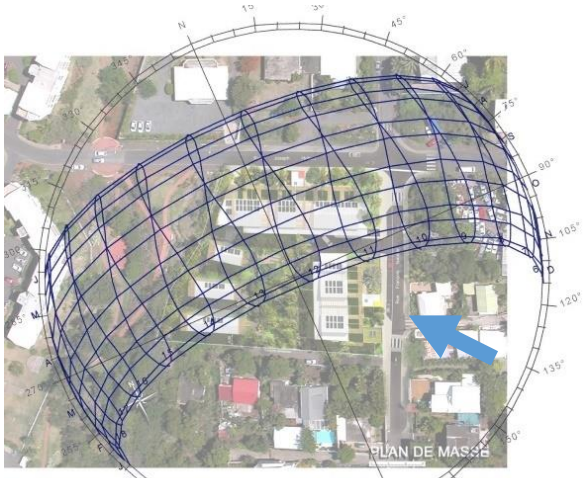


Figure 3- 12: Héliodon et vents dominants Ilet du Centre (© auteur)

4.1.2.5 Une conception interne débitante

Les Figure 3- 10, Figure 3- 11 et Figure 3- 13 illustrent la matérialisation architecturale des concepts et principes pris en compte pour ce projet. La Figure 3- 12 illustre l'orientation solaire et par rapport aux vents dominants des bâtiments.

Autant pour les logements que pour les bureaux, il est important de souligner le soin apporté à l'organisation interne des locaux (voir Figure 3- 14). L'objectif recherché a été de favoriser au maximum les écoulements internes, débitants, dans la **zone de vie** et de limiter les pertes de charge afin d'optimiser le potentiel de vitesse d'air dans les locaux.

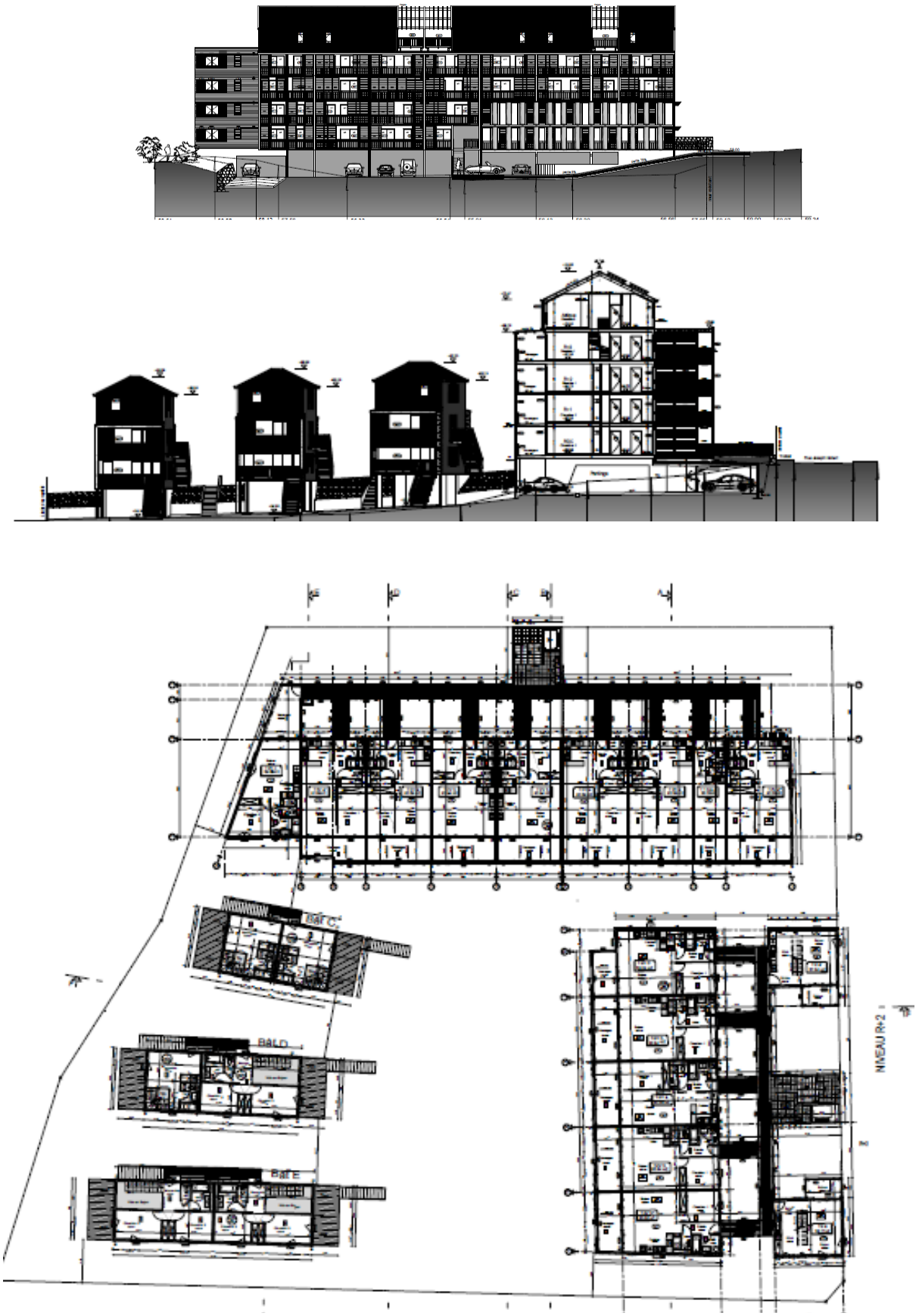


Figure 3- 14: Façade (haut), coupe (milieu) et plan (bas) de l'Ilet du Centre © 2APMR AP architectures

4.1.2.6 Organisation des logements

L'organisation des dessertes par une coursive extérieure permet de proposer des logements avec systématiquement deux façades opposées, distantes d'environ 10m et par là de permettre une ventilation traversante débitante du logement (voir Figure 3- 15). L'intimité est préservée par l'éloignement de la coursive principale desservant les logements, alors que de petites passerelles privatives desservent chaque logement depuis celle-ci. L'organisation interne conforte ce potentiel avec une pièce de vie proposant en enfilade séjour et cuisine alors que la chambre et le bloc salle de bain/WC s'organisent en face (voir Figure 3- 16). Une ouverture dans la cloison de la chambre vers le séjour améliore le potentiel traversant de celle-ci (voir Figure 3- 16) mais n'est pas optimale au sens du potentiel de ventilation traversante.

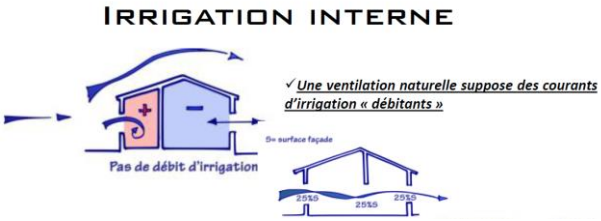


Figure 3- 15: Croquis illustrant les conditions d'irrigation interne (© J Gandemer – F Picgirard 2012)

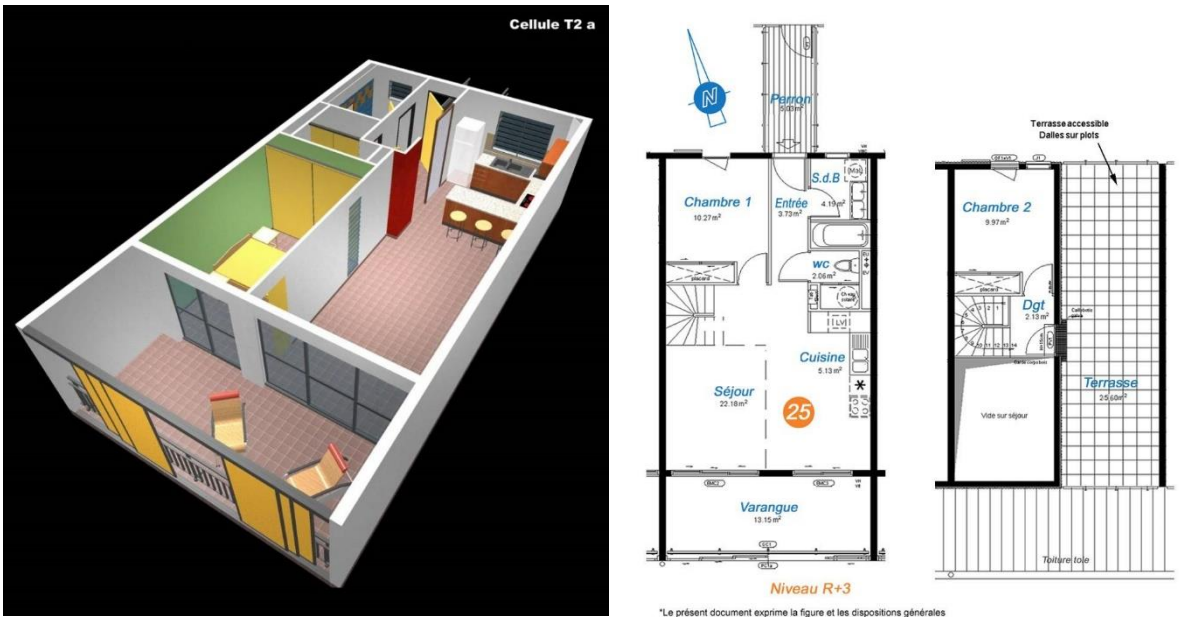


Figure 3- 16: Axonométrie et plan T2 et plans T3 – Ilet du Centre (© auteur)

4.1.2.7 Organisation des bureaux

La conception interne de l'aménagement des bureaux s'est attachée à minimiser préserver la porosité, éviter les obstacles au bon écoulement de l'air (voir Figure 3-17) et irriguer les zones de vie. Pour cela, le choix de bureaux « paysagers » s'est imposé rapidement, ce qui permet de supprimer un grand nombre de cloisonnements internes et évite le modèle couramment diffusé de l'organisation bureau / couloir / bureau, archétype de l'optimisation spatiale et donc financière du bureau cloisonné.

Ce choix est déterminant mais pas suffisant, nous avons pu observer, lors de nos missions de conseils, des locaux traversant, sans cloisons, peu épais, mais dysfonctionnant du fait de la disposition du mobilier (en l'occurrence des rayonnages d'une bibliothèque, disposés parallèlement aux façades et bloquant tout flux…).

Nous avons défini avec soin le positionnement du mobilier et en particulier des étagères en les disposant perpendiculairement aux façades principales. Seul le bloc sanitaire au droit de l'entrée est cloisonné. Par ailleurs, chaque poste de travail se trouve au droit d'une jalousie et

contrôle ainsi directement son confort. On est bien ici avec un **potentiel de ventilation naturelle dans la zone de vie** et susceptible de participer au confort des usagers (voir Figure 3- 17).

Il est à noter les deux bureaux avec cloisons sur pivots aux extrémités qui permettent, si nécessaire d'obtenir une certaine intimité, il s'agit des bureaux des dirigeants. Ce choix permet de concilier intimité temporaire et ventilation naturelle et illustre une solution originale pour y parvenir, issue de ces préoccupations de confort.

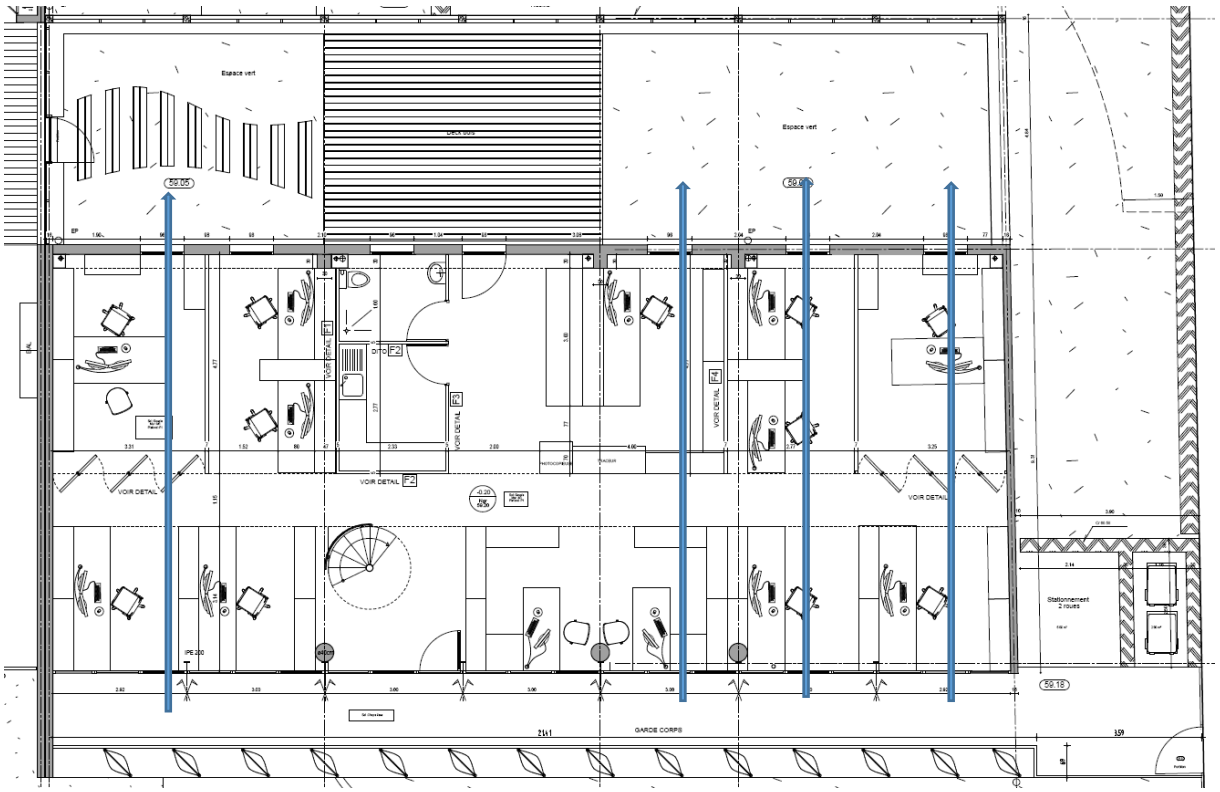


Figure 3- 17: Plan traversant des bureaux – Ilet du Centre (© auteur)

4.1.2.8 Importance du contrôle des charges thermiques internes

D'autres éléments dégradant le confort thermique sont les charges internes. Elles augmentent la température interne et doivent être limitée et/ou évacuées pour éviter toute « surchauffe » préjudiciable.

Elles sont constituées des charges liées à l'occupation humaine et de celles émises par les systèmes actifs dissipant de la chaleur.

Pour les logements leur impact est moindre compte tenu du ratio d'occupation des lieux de 0,4 à 0,5 personnes pour 10 m². Par contre pour les bureaux il est quasiment de 1 personnes pour 10m². Pour mémoire, une personne « émet » environ 120Wh. Ces charges sont bien sûr inévitables et doivent être prises en compte.

Par ailleurs l'activité tertiaire nécessite l'usage quasi permanent des ordinateurs dont on peut évaluer la puissance moyenne dissipée à 100Wh. Le projet propose de confiner ces charges internes des unités centrales dans un local isolé et climatisé et ainsi de les contrôler.

4.1.2.9 Intégration des contraintes environnementales

Le projet propose des solutions limitant l'effet d'ilot de chaleur urbain par l'utilisation de la végétation en cœur d'ilôt et en pied de façade et profiter de son ombrage (voir Figure 3- 18).

4.1.2.10 Limitation de l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU)

Il est important de rappeler ici les enjeux de l'ICU, Jean Jacques Terrin les évoques très bien lorsqu'il rappelle : *« il aura fallu qu'apparaisse l'émergence du réchauffement climatique et des nouveaux risques, à la fois écologiques et sanitaires qu'il provoque pour que l'on remette en cause les recettes de l'urbanisme contemporain et qu'on découvre les bienfaits d'une démarche écologique dont les contours restent encore bien flous. C'est dans ce contexte de nécessaire renouveau qu'ont récemment émergées les réflexions sur le phénomène d'ilot de chaleur urbain. »* (Terrin 2015).Sont apparues aussi des études sur

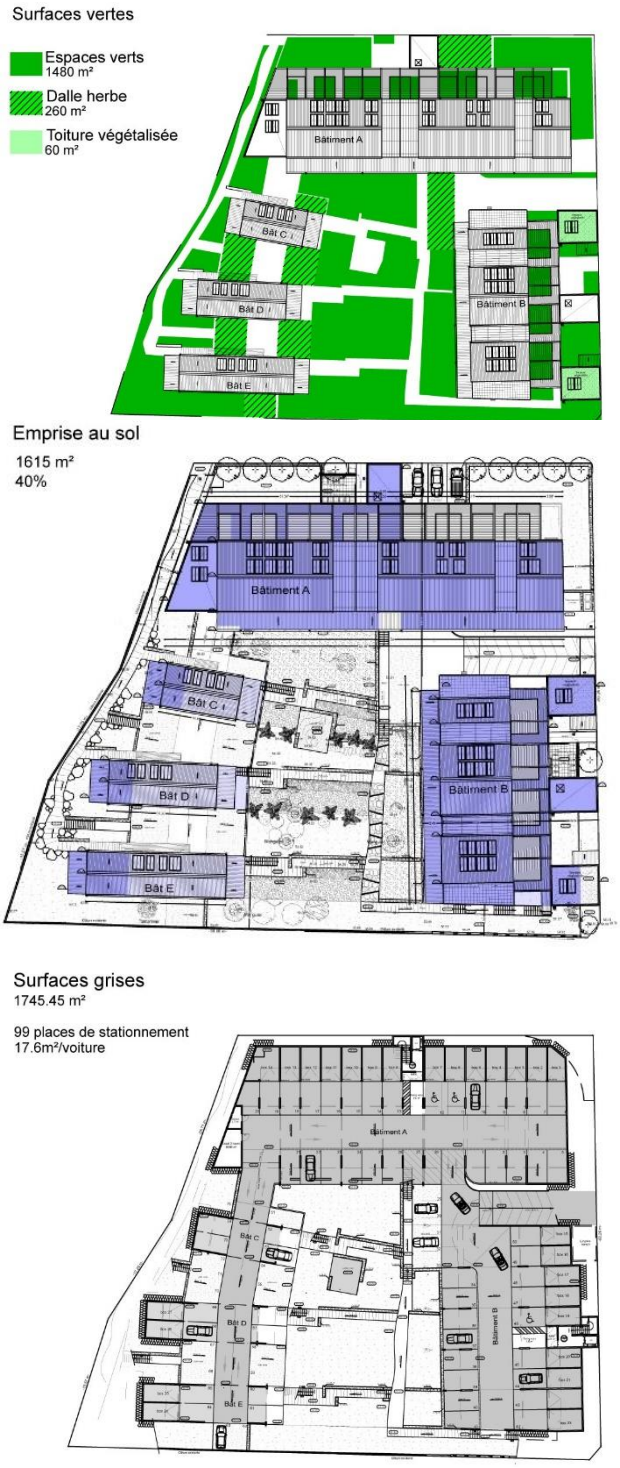


Figure 3- 18: Illustration en plan des ratios de surface « verte »(en haut) de l'emprise au sol (au centre) et des surfaces grises (en bas) (© auteur)

l'efficacité de la végétation (Coccolo et al. 2018), ou des différents paramètres influant sur cet ilot de chaleur (Gago et al. 2013),(Tsoka, Tsikaloudaki, et Theodosiou 2017),(Bouyer et al. 2011).

A l'inverse de nombreuses opérations, grâce à des choix judicieux pour répondre à la problématique du parking, le projet propose un jardin central en pleine terre et des jardins en pied de façades côté rue (voir Figure 3- 19). Au-delà de l'amélioration qualitative, ce choix évite la cour en enrobé noir, première cause de l'effet d'ilot de chaleur. Le positionnement des stationnements majoritairement sous les bâtiments, ainsi que la disposition l'une derrière l'autre des voitures a permis d'optimiser la surface de parking (17,6m²/voiture au lieu de 25m²/voiture habituellement) et libérer de la surface pour les zones en pleine terre si importantes. Les quelques places en surface sont traitées en pav-herbe aux performances supérieures à l'enrobé noir. Les surfaces grises (surfaces totalement perméables et minéralisées) sont réduites au maximum et pour la majorité, cantonnées sous les bâtiments, réduisant ainsi l'imperméabilisation à 43% du site et son potentiel de plantation en pleine terre.

Figure 3- 19: Photos d'illustration des jardins et du traitement des eaux pluviales – Ilet du Centre (© auteur)

4.1.2.11 Apport de la végétation

Le végétal fait partie intégrante du design du projet, il en constitue une des caractéristiques essentielle. Positionné aux abords des bâtiments, il participe de l'amélioration thermique par ombrage du sol et de la protection thermique des façades par ombrage (voir Figure 3- 19).

Le concept paysager de ce projet est très élaboré et se veut la reconstitution d'un écosystème ou les espèces endémiques locales ont une place prépondérante. En effet, leur excellente adaptation au climat et contexte local est garante d'un entretien limité. Par ailleurs le jardin en pleine terre bénéfice des apports gratuits des eaux pluviales se déversant dans cet espace plutôt que dans des réseaux. La temporisation et

l'infiltration sont en effet privilégiées afin de minimiser les désordres et dysfonctionnements en aval de l'opération.
Le projet a pris en compte ces éléments et propose des jardins tant en cœur d'ilot qu'en pied de façade sur rue. 95 % du linéaire de pied de façade a été végétalisé (arbres ou systèmes arbustifs denses) et propose 1480m² de surface de jardin en pleine terre. L'infiltration des eaux de pluie de toiture dans le jardin profite aux plantations tout en limitant les rejets en dehors de la parcelle et améliore ainsi la perméabilité globale du site.
Ces jardins en pied de bâtiment participent aussi de la création d'une bulle de fraicheur bénéfique au niveau bas de l'immeuble, comme nous le verrons dans la partie 2.4.2 sur le comportement hygrothermique.

4.1.3 Evaluation des performances du concept

Nous allons dans cette partie nous concentrer sur la zone bureau du projet. L'objectif est d'en évaluer les performances au regard de différents critères de confort, au final vérifier la validité du concept de transposition de l'architecture vernaculaire (cour plantée, varangue, conception de l'enveloppe), et en particulier du fonctionnement de la ventilation naturelle. Cette évaluation a été faite sur la base de mesures physiques (consommation énergétique, température, hygrométrie, vitesse d'air) et d'enquêtes auprès des usagers.
Dans un premier temps nous avons évalué les performances aérauliques, dans un second temps, les performances thermiques et enfin le ressenti par les usagers. Les études détaillées sont développées en annexe.
Nous livrons ici les conclusions de ces études :

4.1.3.1 Conclusion de l'étude aéraulique (voir Annexe 5) :

Les mesures aérauliques dans les bureaux nous ont permis de déterminer après contrôle de l'homogénéité des débits en différents points d'une jalousie, des coefficients de taux de sortie. Ils ont permis de définir ensuite un coefficient adimensionnel d'extraction.
La comparaison des vitesses du vent ($V_{météo}$) entre la station météo de référence et la station installée sur site (V_{site}) a montré des ordres de grandeurs comparables. Cette similitude nous a amené, en première approche, à considérer que le potentiel du site étudié était comparable à celui de la station et en conclure une certaine représentativité.
Nous avons analysé la vitesse moyenne mesurées sur site. Ceci nous a permis d'évaluer les débits moyens. En obtenant des valeurs de l'ordre de 28 vol/h nous avons conclu sur la possibilité d'obtenir le confort grâce à la ventilation naturelle d'évacuation des surcharges thermiques et l'usage des brasseurs d'air. La corrélation avec l'observation des conditions locales synthétisée dans un diagramme de Givoni, permet de garantir l'obtention du confort 97% du temps et donc à la validité du questionnement initial de la validité de transposition des concepts de l'architecture vernaculaire dans un programme contemporain, dans le contexte spécifique étudié. Ceci souligne l'intérêt de la méthodologie utilisée (L'expérience, la règle du pouce et le référentiel ECODOM), pour proposer des solutions de confort en milieu tropical, dans le contexte de La Réunion, comme alternative efficace à la climatisation.

4.1.3.2 Conclusion sur le confort hygrothermique (voir annexe 6)

Les mesures d'une journée type hiver nous confirment l'absence d'inconfort avec des températures jamais inférieures à 22°C.
Les mesures d'une journée type été mettent en évidence des températures maximales autour de 31°C. En cas d'hygrométrie élevée et d'absence de vitesse d'air on peut donc se trouver en inconfort, sans le recours aux brasseurs d'air.
Toutefois ces températures maximales permettent en mode semi passif (utilisation des brasseurs) de rester dans la zone de confort avec une moindre dépense énergétique (abaissement de la température ressentie d'environ 4°C) (voir Figure 3-19a).
Les dispositifs proposés et décrits dans cette étude de cas permettent donc d'être en situation de confort thermique tout au long de l'année, sans le recours à la climatisation, mais avec le recours à des brasseurs d'air pendant la période chaude.

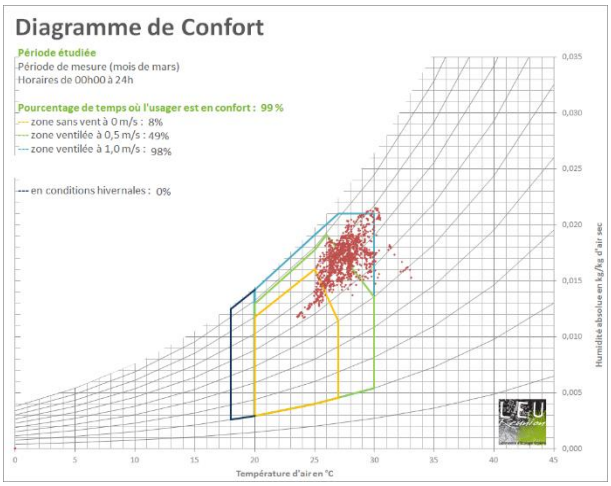


Figure 3-19a Caractérisation du climat par diagramme de Givoni à l'intérieur (capteur 25 bureaux LAB 1)

On peut donc affirmer que cette conception bioclimatique semi passive en ventilation naturelle dans ce contexte est efficiente et peut servir, non de modèle (problématique de la reproductibilité et des spécificités de chaque site), mais de référence, ou d'exemple, pour susciter des questionnements et d'éventuelles vocations pour engager des démarches similaires.
Les intuitions initiales de la volonté de la transposition à l'échelle urbaine de la varangue traditionnelle et de maintien du jardin créole s'avèrent donc corroborée par ces résultats et confirment donc l'intérêt de l'usage de ces dispositifs dans des programmes contemporains.

4.1.3.3 Conclusion des enquêtes (voir annexe 7)

Les enquêtes menées après un an de fréquentation nous ont permis d'apporter un autre regard sur les résultats précédents :

Il en ressort que le confort thermique en période chaude est satisfaisant pour les occupants qui utilisent correctement les dispositifs bioclimatiques (ventilation traversante, protections solaires, brasseurs d'air, …).

Toutefois, certains freins ont été identifiés pour obtenir ces résultats :

- Méconnaissance des dispositifs.
- Bruits extérieurs qui obligent à fermer les ouvrants (circulation routière, voisinage, …) et en particulier les émergences de type moto et scooters.
- Odeurs des poubelles qui obligent à fermer les ouvrants
- Intimité apportée par des rideaux opaques
- Porte d'entrée pleine et de ce fait difficilement utilisable pour la ventilation naturelle pour des raisons d'intimité visuelle et de sécurité.

L'analyse montre l'importance de ne rien négliger dans la conception d'un bâtiment bioclimatique tropical. Dans le cas contraire cela risque de générer, par exemple, des comportements amenant un dysfonctionnent (fermeture des ouvrants) pouvant remettre en cause totalement la conception générale.

Il y a une nécessité pédagogique à expliquer la bonne utilisation des différents systèmes, actifs ou passifs. Comme aime à le rappeler François Garde « dans un bâtiment passif, les utilisateurs doivent être actifs ». Ces enquêtes montrent qu'il faut aller au-delà de la « simple » mesure physique pour évaluer les performances d'un bâtiment. Les enquêtes nous ont permis d'envisager ou réaliser les améliorations suivantes :

Des corrections et pondérations ont été apportées suite à ces constats :

- Mise en place de bacs à compost limitant les déchets fermentescibles sources importante de mauvaises odeurs ;
- Information sur l'usage des locaux auprès des habitants, leur expliquant la possibilité et nécessité de fermer à clé les volets persiennés de la varangue et donc de laisser la baie vitrée du salon ouverte, ainsi que les jalousies de la cuisine et la salle de bain à l'opposé. Ceci permet une ventilation minimale du logement en l'absence des occupants et en toute sécurité, limitant ainsi sa surchauffe.

Des modifications pourraient être envisagées :

- Mise place de matériaux absorbants au plafond des varangues, améliorant la correction acoustique d'un logement à l'autre verticalement ;
- Pose de film opaque sur les vitrages des jalousies des cuisines, améliorant l'intimité ;
- Remplacement des portes palières pleines par des portes avec des jalousies toute hauteur.

Des adaptations règlementaires seraient aussi intéressantes :

- Permettre la mise en place de jalousie dans la partie haute de la porte d'entrée, lui permettant de participer de manière effective (et pas uniquement dans le calcul) à la porosité et donc à la ventilation. Le frein est ici règlementaire. Pour des raisons de sécurité incendie, issue d'une règlementation prévue pour des logements et donc des portes palière de part été d'autre d'un couloir central, la porte palière doit être coupe-feu (CF 1/4h) pour permettre l'évacuation des tiers qui passeraient devant un logement en feu, ce qui n'a pas lieu d'être ici avec le dispositif de coursives déportées.

4.1.4 Conclusion

Cette étude de cas présente une conception bioclimatique globale allant du site à l'aménagement interne des locaux en passant par l'architecture. Elle met en évidence l'importance de l'ensemble des éléments du concept et les risques de dysfonctionnement en cas de défaillance d'un des maillons. Elle montre la nécessité d'un design global et d'une méthodologie précise, allant du paysage à l'aménagement intérieur, en passant par l'enveloppe bâtie.
L'examen de cette étude de cas permet de décrire une méthodologie dont nous avons montré l'efficience et les limites.
Le contexte aéraulique favorable a sans doute permis de compenser une approche sans simulation préalable, mais ne permet pas d'envisager une reproductibilité dans des contextes plus contraints climatiquement.
Malgré le changement de programme et d'époque, des solutions comparables entre une maison traditionnelle (la maison Levieux) et un bâtiment contemporain (l'Ilet du Centre), dans le même contexte climatique, permettent d'atteindre un confort thermique comparable et acceptable, 97% du temps en été.

4.1.5 Quelques chiffres clé du projet (voir annexe 3 chapitre 3)

- 28 (kWh/m²/an) : consommation électrique logements (tous usages, énergie finale) ;
- 56 (kWh/m²/an) : consommation électrique bureaux (tous usages, énergie finale).

4.1.6 Rappel de la méthode utilisée pour l'Ilet du Centre

Le contexte :

- Prise en compte du contexte géographique du site ;
- Evaluation du potentiel de la donnée vent en période chaude à partir des données météo brutes ;
- Connaissance fine de l'environnement proche et de ses interactions à partir de l'observation du site.

Le concept

- Conception du parti général (orientation, implantation) ;
- Utilisation de la « règle du pouce » et des recommandations PERENE ;
- Réflexion sur la conception des abords du bâti (optimisation de l'albédo) ;
- Limitation des apports internes et externes (conception de l'enveloppe, apport de la varangue urbaine), utilisation de la règle du pouce ;
- Réflexion sur l'optimisation intérieure (ventilation débitante, gestion des aménagements intérieurs)

Les usages

- POE ;
- Pédagogie d'utilisation ;
- Mesures correctives.

4.1.7 Limites de la méthode

L'utilisation de la règle du pouce, de l'expérience ne permettent pas d'évaluer, de manière fiable, les performances futures. Dans le contexte relativement favorable du projet (site à fort potentiel de ventilation naturelle et à conditions météo non extrêmes), cela peut être suffisant comme nous l'avons montré, mais dans un contexte plus difficile, cette approche aurait sans doute montré ses limites.
La seconde étude de cas, dans un contexte plus contraint, va proposer une méthode différente de conception faisant l'objet de la deuxième partie de ce chapitre. Elle aura pour objet d'envisager de lever une partie des incertitudes de la règle du pouce et des approximations utilisées précédemment. Cette approche a été possible par l'amélioration de nos connaissances et l'apport d'expertise extérieure, en particulier du « Wind engineering » essentiel en milieu tropical pour envisager une conception en ventilation naturelle de confort.

4.2 Etude de cas le Collège de Bouéni

La première partie de ce chapitre a montré comment l'expérience, la « règle du pouce » et certaines recommandations (ECODOM), permettaient dans un contexte climatique favorable, une conception en ventilation naturelle avec brasseurs d'air. L'objet de cette deuxième partie est de voir, si et comment, on peut arriver à un résultat comparable dans un contexte climatique plus contraint. Ceci permettrait de recouvrir une réalité climatique et contextuelle plus large et donc de permettre une transposition méthodologique pour un plus grand nombre de projets potentiels, c'est l'objet de cette étude de cas.

4.2.1 Contexte

4.2.1.1 Contexte géographique

Le projet de construction du collège Bouéni est implanté à Mayotte dans la baie de Bouéni (voir Figure 3- 20). Il a été Co-conçu par 2APMR, Tand'm et Antoine Perrau architectures (auteur), en collaboration avec le bureau d'étude environnemental LEU Réunion, à l'issue d'un concours de maîtrise d'œuvre initié par le vice-rectorat de Mayotte en 2014. Dès les premières esquisses, la volonté de proposer un projet bioclimatique et environnemental exemplaire a été affirmée par l'équipe. En effet l'isolement relatif du site et ses qualités méritaient le plus grand respect et une conception sensible.
La bonne compréhension et connaissance du site ont été le point de départ de cette réflexion.

Figure 3- 20: Localisation du projet vue aériennes – (© Google Earth)

4.2.1.2 Contexte climatique

Les coordonnées GPS du site sont : 12'55''15S - 45'05''17E

Les données météorologiques sont issues du fichier météorologique de Mayénergie de la station de Dzaoudzi-Pamandzi.

4.2.1.2.1 Température

Les températures moyennes horaires sont élevés avec en majorité des températures variant entre 28 et 30°C (voir Figure 3- 21). On note que les variations entre le jour et la nuit sont faibles, avec 5°C de différence en moyenne. Les variations saisonnières sont également faibles, environ 4°C. On retrouve bien là les caractéristiques de températures d'un climat tropical.

4.2.1.2.2 Pluviométrie et Humidité

Le site d'étude est moyennement pluvieux avec des précipitations de 1100mm sur le site d'implantation du collège (voir Figure 3-22). On distingue une saison humide (novembre à avril) et une saison sèche (mai à octobre). Le projet se situe dans une zone avec des précipitations plutôt dans la gamme basse pour Mayotte.

Ces caractéristiques confirment le contexte tropical humide.

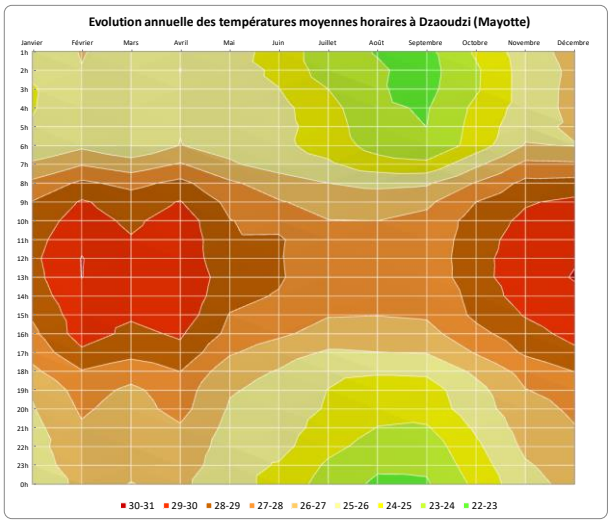
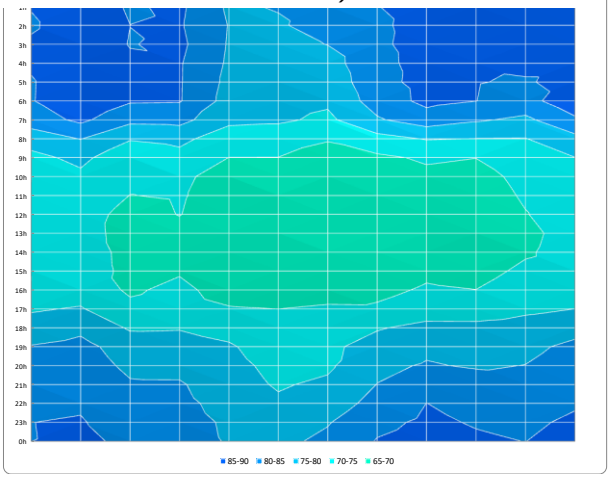
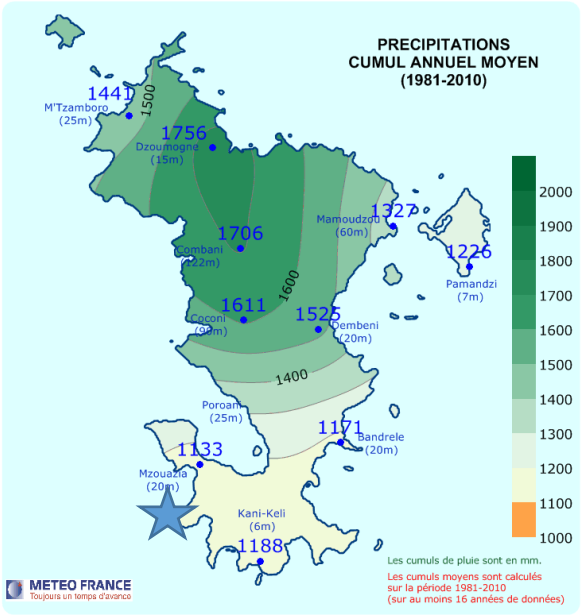


Figure 3- 21: Graphique évolution annuelle des températures à Dzaoudzi -Pamandzi– (© Météo France)





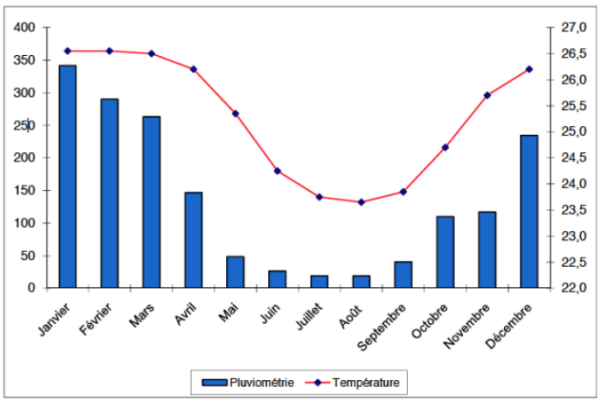


Figure 3- 22: Carte de répartition des cumuls annuels moyens de précipitation (à gauche) graphiques d'évolution annuelle de l'humidité à Dzaoudzi-Pamandzi (à droite haut et bas) – (© Météo France)

4.2.1.2.3 Aérologie

Les vents dominants (voir Figure 3- 23 et Figure 3- 24) proviennent principalement :

- En saison fraiche : Sud-Sud-Est à Sud-Ouest
- En saison chaude : Nord-Ouest à Nord-Nord-Ouest

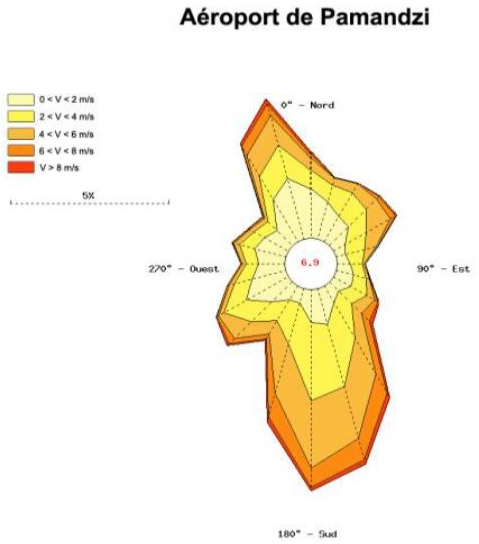


Figure 3- 24: Rose des vents de Mayotte-aéroport de Pamandzi - © Météo France

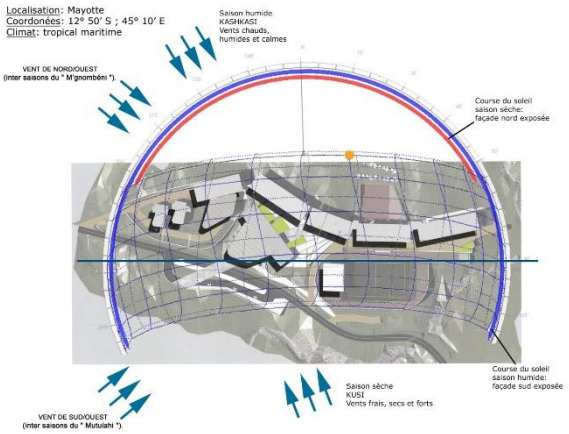


Figure 3- 23: Plan de masse du collège avec Héliodon et données vent – schéma (© LEU Réunion)

4.2.1.2.4 Recalage climatique du site

Nous avons montré dans la première partie de ce chapitre l'importance de la donnée vent et de sa grande variabilité potentielle entre la source (station météo) et le site considéré.

Afin d'affiner les données météo nous avons ici réalisé un recalage climatique selon la méthode énoncée dans « La Ventilation naturelle en pratique » de l'ADEME et Jacques Gandemer (F Picgirard - J Gandemer 2012) (voir Figure 3- 26). Cette méthode permet d'estimer le potentiel de ventilation naturelle à 10m d'altitude par rapport aux vents de référence (ici la station météo de Dzaoudzi) à 10m d'altitude, en utilisant la formule :

$$U_z = K_1 \times K_2 \times U_{ref}$$

Avec :

U_z : Potentiel de ventilation sur site

$Uref$: Potentiel de ventilation de référence

K_1 : Coefficient de passage dû aux effets de rugosité

K_2 : Coefficient de passage dû aux effets topographiques

Les coefficients de rugosité et de topographie sont des pondérations par rapport aux vents de référence ; celui-ci étant considéré comme égal à 1. Ainsi, un coefficient égal à 0.5 signifie que

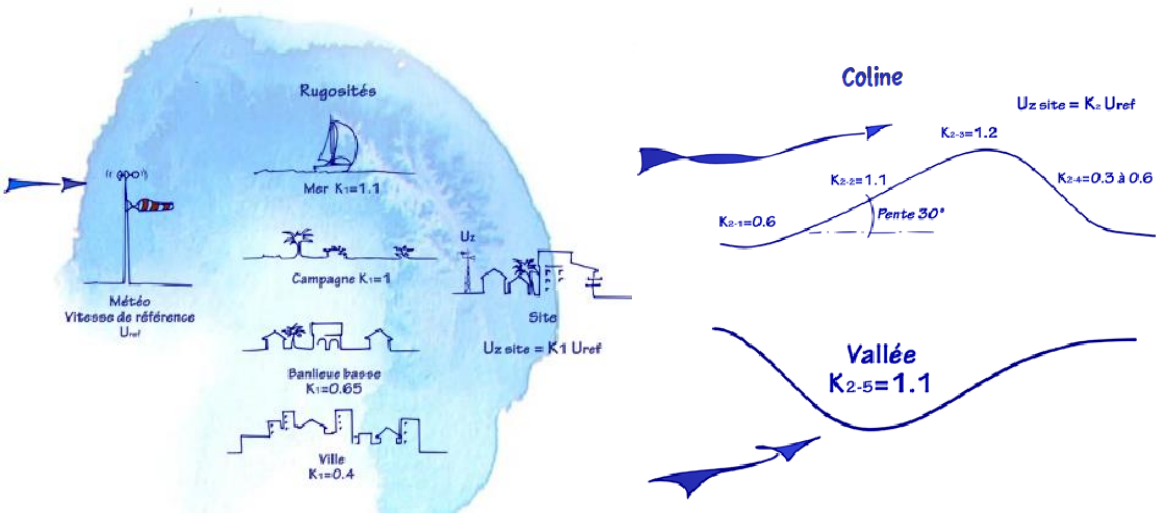


Figure 3- 26: Croquis coefficients de rugosité (à gauche) et coefficient de topographie (à droite) (© F. Picgirard – J ; Gandemer, 2012)

Figure 3- 25: Coupe schématique du site dans l'axe SE-NO – illustration des coefficients de topographie – (© LEU Réunion)

50% du potentiel du vent initial à 10m d'altitude se retrouvera sur le site d'implantation du projet.

Sur site (voir Figure 3- 25) on distingue deux typologies de vents dominants :

- Les vents du Sud-Sud-Est jusqu'à Sud-Sud-Ouest en saison fraiche
- Les vents du Nord-Ouest à Nord-Nord-Ouest en saison chaude

Tableau 3- 3: Calcul du coefficient de rugosité du site selon la direction du vent

	Vents SSE-SSO en hiver	Vents NO-NNO en été
K1 (rugosité)	1.1	1
K2 (topographie)	0.7	0.5
K (rugosité + topographie)	**0.8**	**0.5**

On constate que le potentiel de ventilation naturelle **sur site** est de 80% en hiver à 10m par rapport aux vents de référence et de 50% à 10m en été (voir Tableau 3- 3), soit la moitié du potentiel du site.

Il est donc apparu primordial de concevoir un bâtiment en optimisant au maximum les vents provenant du Nord-Ouest à Nord-Nord-Ouest.

Nous avons analysé le fichier météorologique de Dzaoudzi pour déterminer le pourcentage des niveaux de vitesse où le vent est supérieur ou égal à 2,50m/s et dépasse 50% du temps pour toutes les directions et sur l'année. Nous obtenons que pour 69,5% du temps, les vitesses de vents sont supérieures à 2,50m/s pour toutes les directions. Comme énoncé dans le guide ventilation naturelle (F Picgirard - J Gandemer 2012) et au vu des vitesses de vents, nous pouvons conclure que **le site permet, en première approche, de développer une stratégie de ventilation naturelle** pour le confort thermique des usagers du futur bâtiment.

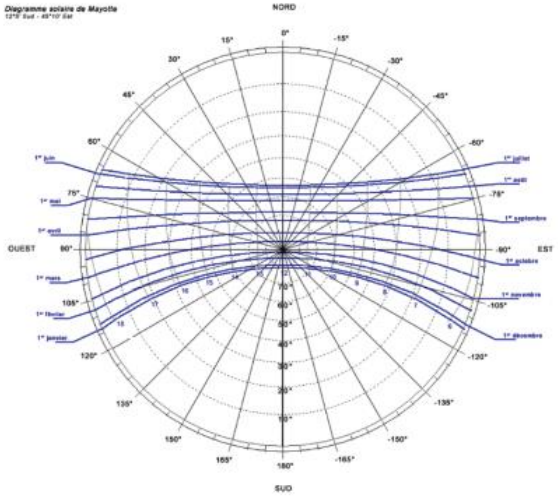


Figure 3- 27: Diagramme solaire de Mayotte, illustrant la nécessité de se protéger sur toutes les orientations – (© auteur)

Nous remarquons également (voir Tableau 3- 4) que les vitesses de vents sont plus importantes en hiver qu'en été. On y trouve des moyennes égales à environ 4 à 5 m/s en hiver alors qu'en été, nous avons des valeurs plutôt de 2 à 3 m/s.

Tableau 3- 4: Pourcentage du temps avec un vent supérieur à 2,5m/s par mois

	Vitesse de vent moyen (m/s)	**Pourcentage de vitesses de vents supérieures à 2,50 m/s**
Janvier	3,10	59,41%
Février	2,83	52,02%
Mars	2,66	54,84%
Avril	3,35	62,63%
Mai	4,38	82,93%
Juin	5,35	90,99%
Juillet	4,77	85,48%
Août	3,56	70,83%
Septembre	3,17	60,35%
Octobre	3,13	65,73%
Novembre	3,49	70,83%
Décembre	3,04	62,23%
Année	**3,57**	**69,49%**

Il est donc primordial de concevoir un bâtiment en favorisant l'accès à la **ventilation naturelle en été en profitant au maximum des vents venant du Nord-Ouest et Nord-Nord-Ouest.** Ce qui correspond à la période la plus critique en termes de confort hygrothermique.

4.2.1.2.5 Ensoleillement

Le diagramme solaire de Mayotte (voir Figure 3- 27) nous montre que la course du soleil varie à 12h au maximum de 54°N le 1er juillet et de 11°S le 1er décembre. Il est donc important de

protéger efficacement le bâtiment du rayonnement solaire et ceci pour toutes les orientations. La façade Sud subira de fortes sollicitations pendant toute la période estivale. La conception de l’enveloppe devra limiter au maximum les apports thermiques par rayonnement solaire.

4.2.1.3 Programme

Le projet consiste en la création d'un collège 900 élèves et de ses équipements associés, logements de fonction et équipements sportifs à Bouéni, Mayotte.
Surface totale : 6764m² SFP.
La demande initiale du maitre d'ouvrage ne comportait pas de critères environnementaux spécifiques. Une attention particulière était demandée pour l'adaptation à la topographie, la nature du sol, le contexte sismique, générant une complexité et des risques soulevés dans le programme.

4.2.2 Concept général

4.2.2.1 Parti

Dès la genèse du projet, nous avons cherché à développer une stratégie de conception bioclimatique et en particulier à optimiser le potentiel de ventilation naturelle de confort (voir Figure 3- 28). A la lumière de l'analyse climatique développée ci-dessus, il s'est rapidement orienté vers un étirement de bâtiments le long d'un axe Est Ouest permettant de s'adapter au mieux à la topographie, d'optimiser l'orientation solaire et aux vents dominants (voir Figure 3- 29 et Tableau 3- 5). En complément de cette stratégie aérothermique globale, la végétalisation des abords a fait l'objet d'une grande attention (voir Figure 3- 29). En particulier en amont du site, un arboretum de restauration écologique a été mis en place.
Nous avons, pour ce projet, utilisé des outils de simulation et non uniquement la règle « du pouce » comme pour l'ilet du centre selon la méthodologie décrite en note préliminaire de ce chapitre. En effet, la plus grande complexité du contexte, l'évolution des outils de simulation et l'intérêt de pouvoir étudier plusieurs hypothèses comme aide à la décision, justifiaient ce nouvel usage pour ce projet.

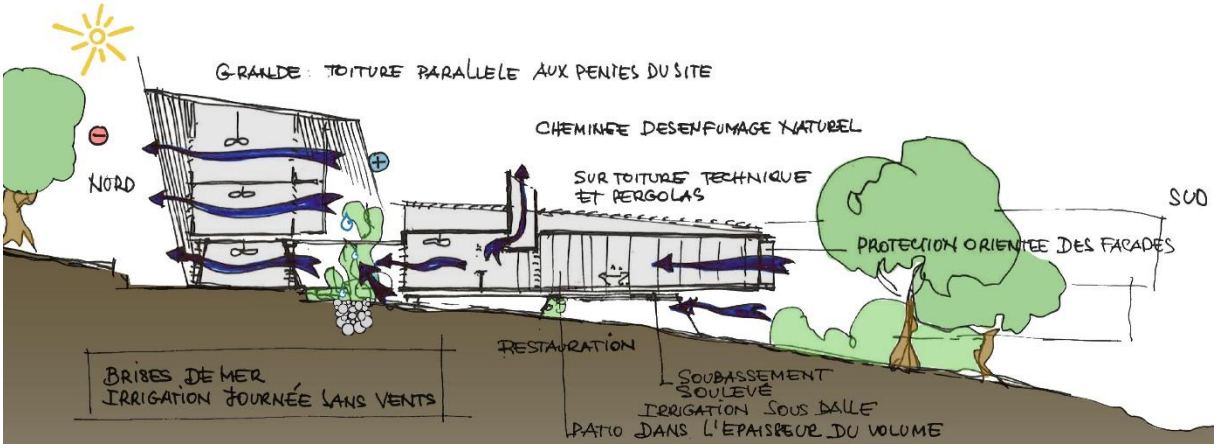


Figure 3- 28: Croquis de principe de ventilation naturelle – phase concours – (©2APMR- Antoine Perrau architectures)

4.2.2.2 Implantation des bâtiments et morphologie

Figure 3- 29: Plan mase du projet de collège – (© auteur)

Les bâtiments D, E, F, G et H sont implantés selon un axe Est-Ouest avec quelques variations (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

Tableau 3- 5: Orientation des différents bâtiments du collège par rapport à l'axe Est-Ouest

	Angle par rapport à l'axe Est-Ouest
Bâtiment A (administration, CDI)	-27,6° à -63,2°
Bâtiment D (cuisine, restauration, enseignement)	+13.29°
Bâtiment E (enseignement)	-33,70°
Bâtiment F (enseignement)	-20,37°
Bâtiment G (enseignement)	-1,78°
Bâtiment H (enseignement)	+11,48°

Ces implantations permettent d'optimiser le fonctionnement aéraulique des différents bâtiments. En effet, ils sont orientés globalement perpendiculairement par rapports aux vents dominants (voir Tableau 3- 5), comme nous venons de la constater précédemment, ce qui permet d'obtenir le meilleur potentiel de ventilation naturelle.
Le fait que les bâtiments D, E, F, G, H soient à des niveaux différents par rapport au bâtiment A va permettre un meilleur fonctionnement aéraulique en limitant les effets de masque, à l'exception de la restauration de D, sous le vent de la partie enseignement.

La morphologie des bâtiments est globalement allongée de manière à offrir la plus grande surface aux vents et de faible épaisseur pour favoriser le potentiel de ventilation traversante en limitant les pertes de charges. Cependant les bâtiments A et D (avec la restauration) proposent des typologies différentes (épaisseur plus importante), pour des raisons programmatiques et sont situés sous les vents dominants des bâtiments D (partie enseignement), E, F et G et devront de ce fait, faire l'objet d'une approche spécifique.
Par ailleurs, un fonctionnement aérothermique d'un bâtiment suppose une protection solaire renforcée sur les façades (voir Figure 3- 31 et Figure 3- 31). Pour cela, une étude fine de l'ensoleillement sur façade a été réalisée pour optimiser le dimensionnement des protections solaires des façades Sud et Nord et réduire les apports externes.
Pour le bâtiment D (voir annexe 8 chapitres 3), il a été envisagé, dans un premier temps, une approche spécifique pour la partie restauration. En effet, celle-ci est sous le vent de l'enseignement (effet de masque au Nord) et beaucoup plus basse. De ce fait, ni la ventilation traversante, ni l'usage d'un puits dépressionnaire naturel, n'étaient possibles, nous avons alors envisagé l'utilisation d'une ventilation de patio avec extraction assistée par l'implantation de brasseurs d'air de grande taille dans un patio central. Au final, cette option, bien qu'efficace, a été abandonnée pour la réalisation d'un restaurant ouvert totalement (type Faré traditionnel).

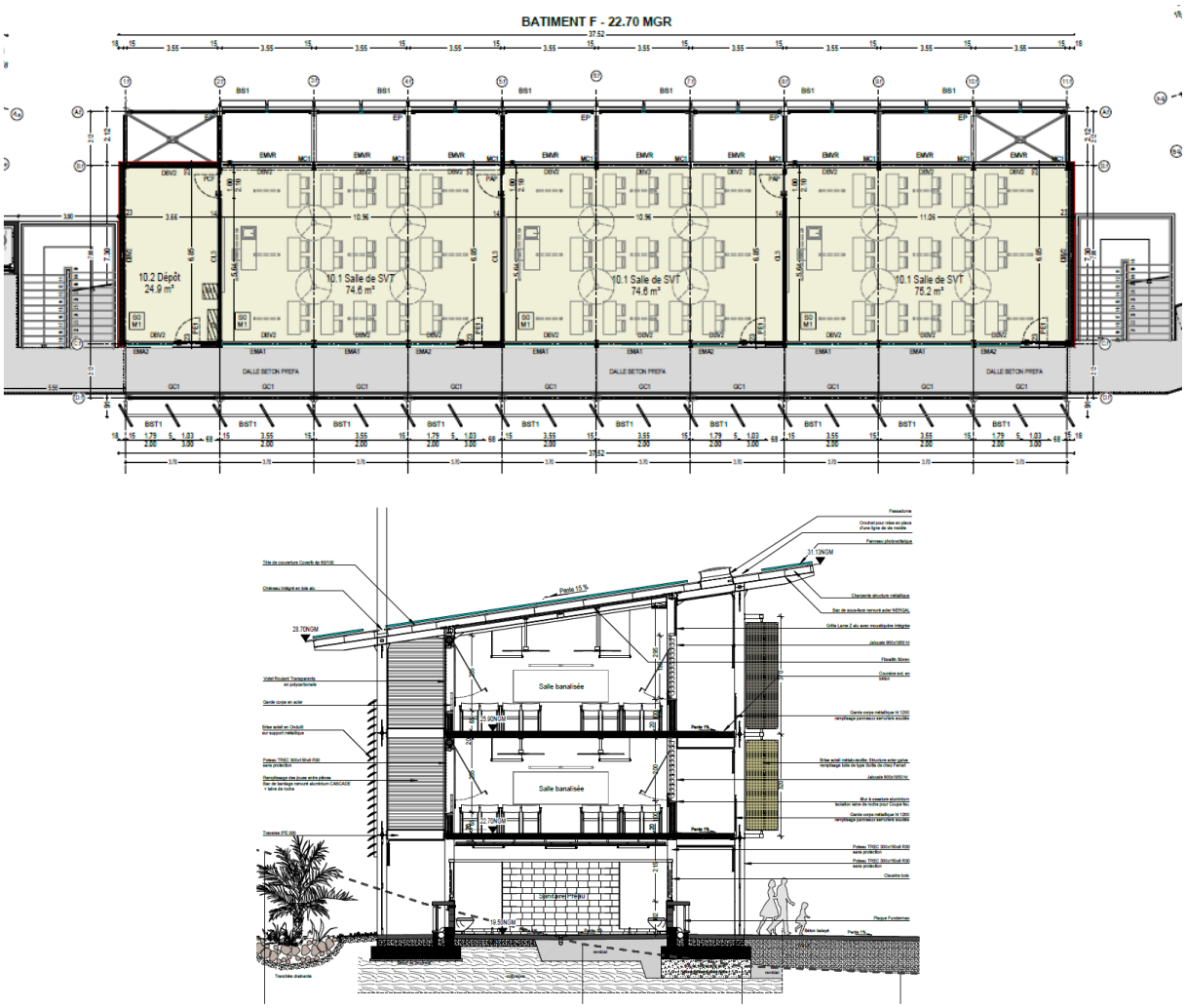


Figure 3- 30: Illustration des protections solaires des façades d'un bâtiment d'enseignement type, plan (en haut) et coupe(en bas) © Antoine Perrau Architectures

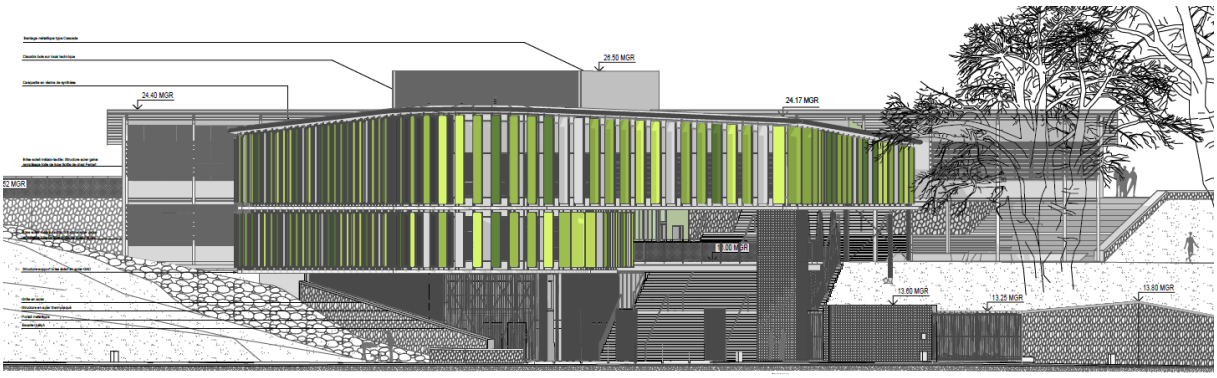


Figure 3- 31: Illustration des protections solaires des façades du bâtiment A- © Antoine Perrau Architectures

4.2.3 Evaluation des performances du concept

4.2.3.1 Méthodologie

Dans cette étude nous avons utilisé les résultats d'une étude en soufflerie physique. Celle-ci a permis :

- Dans un premier temps : d'optimiser les formes architecturales, forme des toitures, épaisseurs bâties, inter distances entre bâtiments, dimensionnement du puit dépressionnaire du bâtiment A ;
- Dans un second temps de définir les vitesses d'air dans les locaux et donc de calculer des taux de renouvellement d'air en parallèle des STD (travail itératif) .Ceci nous a permis de tester plusieurs scénarii architecturaux (protections solaire, performance de l'enveloppe…) ;
- Dans un troisième temps et de manière indirecte, la définition de coefficients de pression aux vents extrêmes a permis aussi d'optimiser le dimensionnement structurel. (hors champ de ce travail mais effet positif induit de la co-conception).

4.2.3.2 Confort hygrothermique

A partir des données climatiques rappelées ci-dessus, nous avons abordé la thématique du confort hygrothermique du projet.

Nous avons, là encore, évalué le confort grâce à un diagramme de Givoni. Lors des études du confort hygrothermique dans les phases suivantes, nous exprimerons le confort grâce à ce diagramme.

4.2.3.2.1 Fichier météorologique utilisé

Le fichier météorologique (voir Tableau 3- 6) utilisé est celui fourni par Mayénergie (IMAGEEN et ESIROI 2013).

Tableau 3- 6: Pourcentage de temps dans la zone de confort pour des vents de 0m/s à 1,5m/s et nombre d'heures ou la température dépasse 28°C, 30°C, 32°C et 33°C, source Mayénergie

	Pourcentage dans la zone de confort pour v=0m/s (%)	**Pourcentage dans la zone de confort pour v=0,5m/s (%)**	**Pourcentage dans la zone de confort pour v=1m/s (%)**	**Pourcentage dans la zone de confort pour v=1,5m/s (%)**	**Nombre d'heures où la température >28°C**	**Nombre d'heures où la température >30°C**	**Nombre d'heures où la température >32°C**	**Nombre d'heures où la température >33°C**
Toute l'année 0h-23h	31	68	97	100	1683	366	0	0
Occupation scolaire 7h-18h	22	55	95	100	1130	236	0	0

4.2.3.2.2 Commentaires

Sur cette base on note qu'à l'extérieur, les données météorologiques donnent un taux d'inconfort de 5% sur l'année **pendant la période d'occupation des locaux (7h-18h)** pour des vitesses d'air supérieures ou égales à 1m/s sur le corps et de 0% pour des vitesses d'air supérieures ou égales à 1,5m/s.

A partir de ces constats et en fonction des données programmatiques, le plan masse élaboré met en évidence deux problématiques de ventilation différentes : les bâtiments A et B plus épais (pour des raisons programmatiques) et sous les vents dominants de Nord-Ouest des autres bâtiments, les bâtiments, C, D, E, F, G et H.

Nous avons donc défini deux stratégies différenciées pour ces deux catégories de bâtiments.

La méthode suivie pour ces deux groupes de bâtiments sera identique et se base sur une approche quantifiée avec ENERGY+ (Crawley et al. 2000), déjà quantifiée dans des cas identiques avec d'autres outils type TRNSYS (Krauss et al. 2005) et des études spécifiques et non plus sur la « règle du pouce », comme pour l'Ilet du Centre. Nous avons donc suivi la méthodologie suivante :

- 1-Quantification du potentiel de ventilation naturelle avec production des taux de renouvellement d'air potentiels dans les locaux calculés à partir des vitesses d'air mesurées. (Etude réalisée en soufflerie physique, voir Rapport 15- 104 VN V1 Aérodynamique Eiffel – voir annexe 8 chapitre 3) ;
- 2- Optimisation des hypothèses afin d'ajuster au mieux le dimensionnement (période d'utilisation des locaux…) ;
- 3-Utilisation des données issues de l'étude du potentiel de VN pour quantifier le confort thermique à partir de simulations thermiques dynamiques avec étude de plusieurs scénarii. (Étude faite avec ENERGY+,) : Utilisation et/ou vérification par itération des taux de renouvellement d'air obtenus par calcul depuis les vitesses d'air données par l'étude de maquette en soufflerie et ceux nécessaires au confort issu des STD et non à partir d'hypothèse des simulations numériques, ce qui est l'intérêt de cette méthode. Plusieurs hypothèses seront testées (variation de la porosité, utilisation de lames Z, amélioration de la protection des pignons…) voir résultats en annexe 9 chapitre 3.

Pour mémoire, c'est bien la donnée vitesse d'air dans les locaux et dans la zone de vie qui nous intéresse, afin de bénéficier du potentiel de rafraichissement lié à cette vitesse sur le corps.

Nous allons illustrer ci-après notre démarche pour le bâtiment A. Son fonctionnement en ventilation naturelle par l'utilisation d'un puit dépressionnaire exposé au vent en fait son originalité. Les études des autres bâtiments sont jointes en annexe 9 chapitre 3.

4.2.3.3 Exemple du bâtiment A

Les locaux étudiés ici font partie du bâtiment A regroupant le pôle administration, la médiathèque - CDI, la salle des professeurs et quelques salles de permanence (voir Figure 3-32):

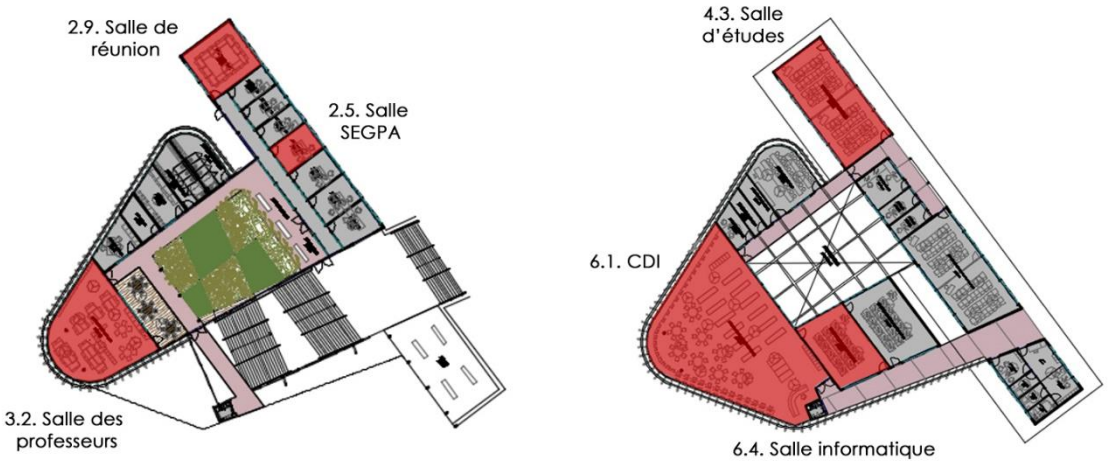


Figure 3- 32: Vue en plan des salles étudiées dans le bâtiment A – niveau 16 NGM (gauche)/niveau 19,5NGM (droite) – *(© auteur)*

4.2.3.3.1 Caractéristiques techniques des locaux étudiés

Le travail de co-conception initial avait permis d'identifier la spécificité de ces deux bâtiments et leur position défavorable pour les vents de Nord-Ouest. Ils sont situés sous le vent des bâtiments d'enseignement et ont des formes plus compactes liées à leurs programmes fonctionnels respectifs. Dès lors des solutions particulières ont été élaborées. Afin de s'affranchir de ce handicap, des puits dépressionnaires ont été imaginés puis testés. (Voir annexe 8 chapitre 3 rapport 15-104 VN V1 aérodynamique Eiffel). Ce rapport précise :

« Les résultats sont édifiants : Dès qu'un vent de 2.5m/s existe sur le site les champs de vitesses d'irrigation interne se positionnent (en potentiel) à des vitesses moyennes :

- *entre 0.35 m/s et 2 m/s pour le Bâtiment Accueil et Administration ;*
- *entre 0.45 m/s et 1.35 pour le Bâtiment Restauration (ventilation de patio assistée). »*

On peut voir là encore l'illustration de l'importance de la co-conception ingénieur- architecte dès l'esquisse, sur la base du partage d'expérience, puisqu'elle a défini des formes et solutions architecturales spécifiques, en particulier des puits dépressionnaires (voir Figure 3- 33 et Figure 3- 34) qui n'auraient pas pu être développées dans des phases ultérieures sans remise en cause fondamentale du parti initial.

Figure 3- 33: Schéma de principe du puit dépressionnaire administration (© auteur)

Les caractéristiques techniques des locaux (conductivité, densité, capacité thermique massique et épaisseur) situés au rez-de-chaussée sont répertoriées dans l'annexe 9 chapitre 3.

4.2.3.3.1.1 Apports internes

Toutes les données concernant les apports internes sont répertoriées en annexe 9 chapitre 3 avec les périodes d'occupation des locaux:

4.2.3.3.1.2 Ventilation

Dans le cas de base, nous avons pris comme objectif (hypothèses issues de STD pour obtenir le confort dans les locaux) des taux de renouvellement d'air de :

- 15 vol/h : salle 2.5 (SEGPA); salle des professeurs (3.2) ; salle informatique ; CDI (6.1)
- 60 vol/h : salle 2.9 (salle de réunion)
- 45 vol/h : salle 4.3 (salle d'études)

Les disparités de taux utilisés s'expliquent par les différences de charges internes et externes de ces locaux. L'étude en soufflerie, en parallèle, a confirmé l'obtention de ces valeurs de taux de renouvellement d'air pour ces locaux (à partir des vitesses d'air mesurées), validant les hypothèses.

4.2.3.3.2 Résultats & Analyse

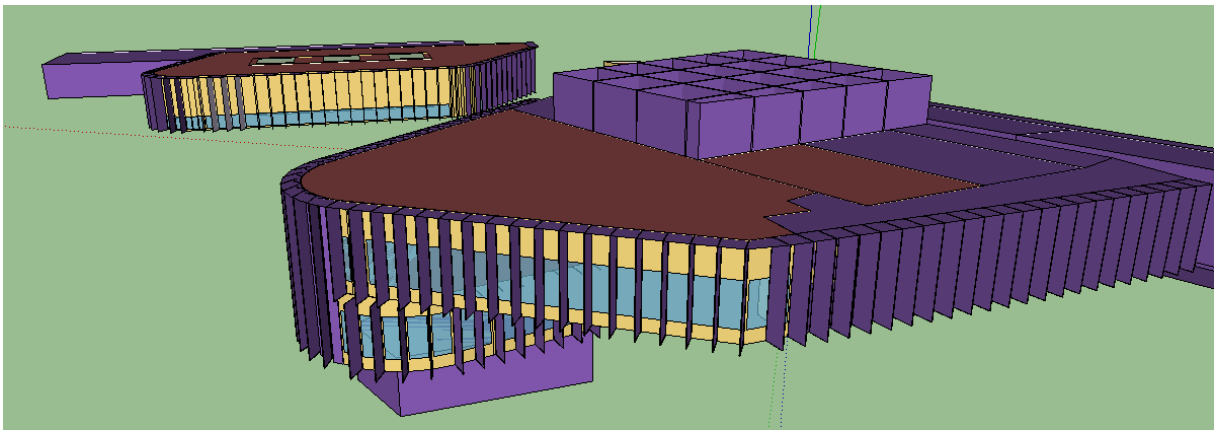


Figure 3- 34: vue en perspective restauration et CDI – (© LEU Réunion)

Après avoir entré tous les paramètres et caractéristiques du bâtiment (voir annexe 9 chapitre 3), nous avons réalisé le calcul à proprement parler qui donne les résultats suivants (voir Tableau 3- 7).

Tableau 3- 7: Pourcentage de confort (%) et température intérieure (°C) selon la zone de confort (1m/s ou 1,5m/s) pour les salles du bâtiment A

	Pourcentage zone de confort pour V=1m/s (%)	**Pourcentage zone de confort pour V=1,5m/s (%)**	**Température intérieure >28°C**		**Température intérieure >30°C**		**Température intérieure >32°C**	
			Nombre d'heures	**%**	**Nombres d'heures**	**%**	**Nombres d'heures**	**%**
Salle 2.5	80	97	1452	76,7	614	32,5	53	2,8
Salle 2.9	72	94	1454	76,8	693	36,6	67	3,5
Salle 3.2	73	92	1374	72,6	639	33,8	83	4,4
Salle 4.3	71	93	1452	76,7	673	35,6	75	4,0
Salle 6.1	71	91	1377	72,8	657	34,7	99	5,2
Salle info	65	84	1525	80,6	864	45,7	272	14,4

Nota : Le nombre d'heures d'occupation total sur l'année est de 1892h.

Le confort est atteint dans toutes les pièces sauf pour la salle informatique la plupart du temps. En effet, les valeurs de température supérieure à 32°C sont comprises entre 53 et 99h sur toute l'année, ce qui représente environ 15 jours d'inconfort pour les élèves et professeurs.
Concernant la salle informatique, dans un fonctionnement en ventilation naturelle classique, le confort thermique ne sera pas atteint. En effet, il y a plus de 272h où la température est supérieure à 32°C, ce qui représente environ 40 jours d'inconfort, à cause de l'importance des apports internes dus aux ordinateurs. Dans la partie suivante, nous avons donc réfléchi à des dispositions permettant d'améliorer le confort pour les usagers de cette salle en étudiant trois variantes.
L'étude en soufflerie (voir annexe 8) a validé les taux de renouvellement d'air utilisés pour les STD grâce à la mesure des vitesses d'air sur maquette physique.
Pour toutes les autres salles (voir annexe 9), le confort thermique sera atteint sans utilisation de système de rafraîchissement artificiel, mais avec une conception sobre et réfléchie dans une logique bioclimatique.

Apport de la soufflerie : l'étude en soufflerie, met en évidence des disparités importantes de potentiel de ventilation entre locaux d'un même bâtiment et entre deux bâtiments proches, mettant ainsi en exergue l'importance des effets de masque et donc de l'environnement proche. Ainsi les Tableau 3- 8 et Tableau 3- 9 montrent des différences importantes avec une majorité des points avec des vitesses entre 0,5m/s et 1,5m/s pour le bâtiment F alors que les vitesses sont globalement plus faibles pour le bâtiment A. Ceci s'explique par la position dégagée du bâtiment F alors que le bâtiment A est sous le vent et l'influence du bâtiment E.
On constate aussi de grandes disparités au sein d'un même bâtiment, ainsi les capteurs 22, 23, 24,25 donnent tous des vitesses globalement supérieures à 0,5m/s, alors que les capteurs 34, 35,36 donnent tous des vitesses inférieures à 0,5m/s (voir Figure 3- 36). Ceci illustre l'effet du puits dépressionnaire, optimisant le potentiel de 22, 23 et 24 alors que 34, 35,36 sont confinés entre le bâtiment E et une extrémité de A. Les locaux situés à l'emplacement des points défavorables devront donc avoir recours aux brasseurs d'air pour permettre d'atteindre le confort avec une vitesse d'air assistée mécaniquement.

L'étude en soufflerie (voir Figure 3- 35) confirme donc ici le bien fondé du choix du puit dépressionnaire pour le bâtiment A du fait de sa forme et sa position, alors que le bâtiment F, plus simple et sans interférences bâties s'en passe.

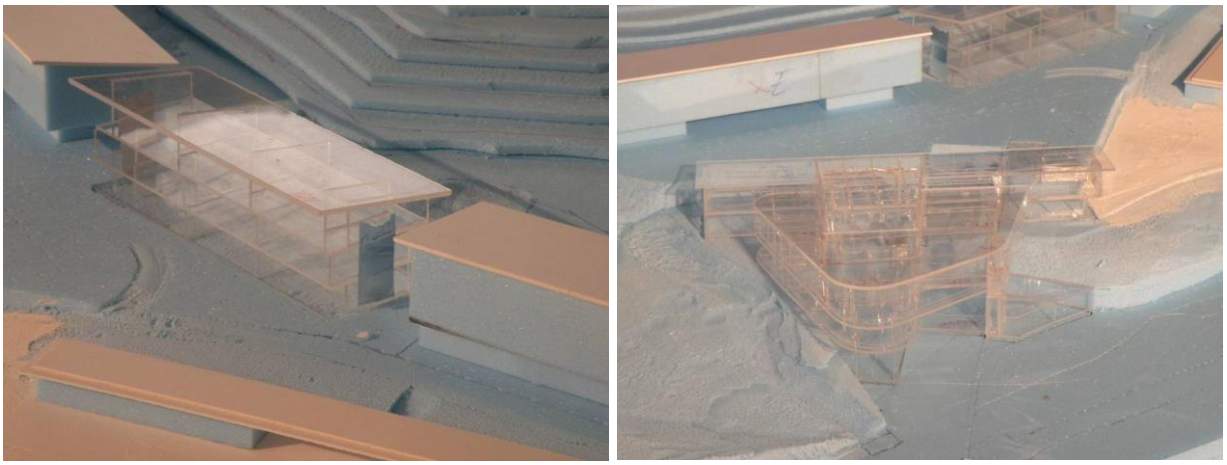


Figure 3- 35: maquette en soufflerie, bâtiment f à gauche, bâtiment A à droite, © Soufflerie Eiffel

Tableau 3- 8: Résultats des mesures de vitesses d'air en soufflerie du bâtiment A

		157,5°	225°	315°	337,5°
	Points	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)
Batiment A	20	1,70	1,25	1,02	0,97
	21	2,00	1,53	0,90	0,73
	22	0,98	1,12	1,00	0,64
	23	1,05	1,19	0,89	0,55
	24	0,94	1,10	0,68	0,31
	25	0,69	1,34	0,55	0,29
	26	1,24	1,66	0,79	0,48
	27	1,50	1,59	1,06	0,42
	28	1,50	1,68	0,96	0,44
	29	1,61	0,55	0,51	0,30
	30	0,99	0,52	0,36	0,30
	31	1,20	0,60	0,33	0,32
	32	1,57	1,02	0,64	0,70
	33	0,78	1,04	0,38	0,40
	34	0,30	0,48	0,27	0,29
	35	0,42	0,48	0,35	0,31
	36	0,43	0,40	0,37	0,33
	37	0,69	0,67	0,75	0,85
	38	0,67	0,73	0,85	1,41
	39	0,68	0,70	0,88	1,32
	40	0,64	0,59	0,89	1,41
	41	0,70	0,65	0,60	0,54
	42	1,09	0,72	0,80	1,00
	43	0,30	0,89	0,65	0,79
	44	1,73	1,25	1,33	0,66
	45	1,77	1,02	1,26	0,91
	46	2,18	0,80	1,13	0,47

Tableau 3- 9: Résultat des mesures de vitesses d'air en soufflerie, bâtiment F.

		157,5°	225°	315°	337,5°
	Points	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)
Bat F - Salles de cours	11	2,18	1,46	0,57	1,68
	12	2,33	1,27	0,68	2,07
	13	2,02	1,17	0,57	1,20
	14	1,42	1,14	1,08	1,99
	15	2,16	0,82	0,47	1,99
	16	2,30	1,29	1,67	1,98
	17	1,56	1,17	0,47	1,32
	18	1,96	0,49	0,48	1,44
	19	2,16	0,96	1,59	1,84

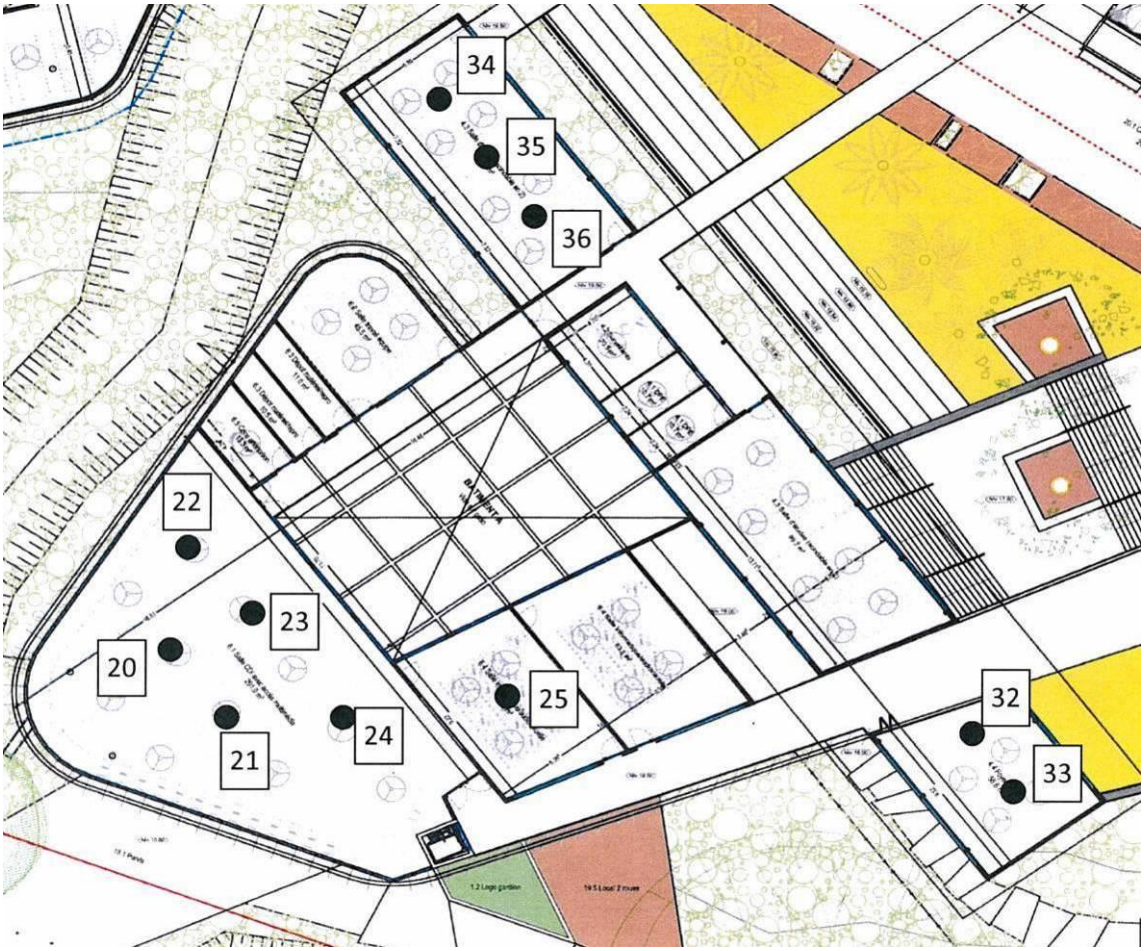


Figure 3- 36: Localisation des capteurs pour les mesures de vitesse en soufflerie

Commentaires :
On constate que le confort thermique sera atteint (voir Tableau 3- 7) pour les salles étudiées, avec des pourcentages de temps dans la zone de confort de 84% à 97% du temps. En l'absence de vent, le recours aux brasseurs d'air palliera ce manque.

4.2.4 Conclusion pour la démarche de conception du collège de Bouéni

La démarche utilisée pour le collège de Bouéni avec l'apport des études en soufflerie physique et des STD nous a permis :

- D'imaginer des dispositifs architecturaux non courants (puit dépressionnaire passif et actif)
- D'obtenir des données et grandeurs physiques de taux de renouvellement d'air sur la base d'une étude en soufflerie physique et non à partir d'hypothèses ;
- De pouvoir simuler plusieurs variantes architecturales ;
- De comparer ces variantes en termes d'efficacité ;
- De pouvoir faire un choix éclairé avec une marge d'incertitude réduite.

Ceci constitue indéniablement un plus par rapport à la règle du pouce et la démarche développée pour l'Ilet du Centre qui se justifiait ici par une plus grande complexité programmatique et un potentiel de vent réduit par des masques de relief.
Toutefois à l'image de l'Ilet du centre, il conviendra de valider, in fine, ce travail par une étude POE, ce qui ne sera possible qu'à compter de la mise en service du collège, à savoir à la rentrée 2019.
Cette étude de cas a permis de valider une démarche conceptuelle avec une optimisation, grâce à des méthodes et des outils plus élaborés.
On peut résumer, dans un ordre chronologique, cette démarche:
Le contexte

- Définition du contexte climatique, température, hygrométrie, ensoleillement, vent. (Établissement de diagrammes de Givoni) ;
- Recalage de la donnée vent (utilisation des coefficients de rugosité et de topographie) ;
- Evaluation du potentiel de ventilation naturelle du site en période chaude.

Le concept

- Conception d'une esquisse et d'un APS en conception intégrée (co-conception) ;
- Conception du parti général (orientation, implantation, morphologie des bâtiments) ;
- Définition de plusieurs approches en ventilation naturelle en fonction du contexte et du programme (ventilation traversante, puit dépressionnaire « passif », puit dépressionnaire « actif ») ;
- Réflexion sur la conception des abords du bâti (plantation et restauration écologique des abords) ;
- Limitation des apports externes (conception de l'enveloppe) ;
- Optimisation des apports internes (prise en compte des périodes d'utilisation dans la journée et l'année) ;
- Etude en soufflerie à couche limite avec modèle physique (mesure des vitesses d'air potentiels dans les locaux) et de manière itérative, simulation thermique dynamique (à partir des taux de renouvellement d'air calculés depuis les vitesses mesurées et des hypothèses d'apports thermiques) ;

- Définition d'un APD avec utilisation des données issues de la simulation: Dimensionnement fin des ouvrages (porosité, protection solaire, conception de l'enveloppe, taille des puits dépressionnaires, des protections solaires, STD (Energy +).

Les outils utilisés :

- La règle du pouce ;
- La co-conception architecte / ingénieur aéraulique ;
- La soufflerie physique à couche limite ;
- Les STD.

Les usagers

- Assurer la transmission des bonnes pratiques auprès des usagers par des actions de sensibilisation et la remise d'un « mode d'emploi » ;
- POE pour d'éventuelles mesures correctives et tirer des enseignements du projet après une année entière d'utilisation ;
- Work in progress…

4.3 Evaluation comparative des concepts architecturaux des deux études de cas

Les deux études de cas présentées nous ont permis de montrer que deux méthodes différentes, appliquées avec discernement en fonction des contextes, permettent d'obtenir des résultats probants mais avec des solutions partiellement différentes pour assurer un confort semi passif des bâtiments.

Points communs des concepts architecturaux :

- Conception thermique de l'enveloppe performante ;
- Organisation intérieure utilisant une trame fine (de l'ordre de 10m de profondeur) ;
- Intégration des contraintes environnementales.

Variantes des concepts

- Ventilation traversante simple de façade à façade (Ilet du Centre) ;
- Ventilation par puit dépressionnaire (Collège, bâtiment A) ;
- Optimisation des dispositifs architecturaux (protection solaires et enveloppe) pour le collège.

Ce sont les éléments de contexte climatique, aéraulique, site et programmatique qui peuvent permettre à l'architecte de choisir les outils appropriés à une conception en ventilation naturelle efficace.
Ces deux études de cas ne permettent cependant pas de déterminer dans tous les cas de figure quels outils choisir mais ils permettent de le faire dans des cas comparables ou moins complexes.

5 Conclusion

Ces deux études de cas, sur des projets conçus à 8 ans d'intervalle, montrent une évolution de l'approche conceptuelle. Même si le gain en termes de confort ne peut être précisément établi, le collège étant en travaux, il apparait malgré tout satisfaisant pour l'îlet du centre. En ce qui concerne le collège, l'approche utilisée sur un site plus complexe et plus contraint, permet de limiter les erreurs, en particulier avec le recalage climatique qui donne une approche plus réelle de la donnée vent sur le site et l'approche en soufflerie qui fournit des données moins hypothétiques pour les STD et donc pour approcher la donnée confort.

L'analyse des deux projets nous aura aussi appris l'importance d'une utilisation d'outils adaptés à la problématique. En effet, à la question « si c'était à refaire » il n'apparait pas évident que nous aurions utilisé les outils de simulation en soufflerie pour l'ilet du Centre. En effet les bons potentiels aérauliques du site et le contexte climatique limitaient grandement le risque de dysfonctionnement, dans ce cas la « règle du pouce », l'expérience et les recommandations ECODOM suffisaient pour atteindre le confort recherché.
Pour le collège Bouéni, il est clair que les solutions mises en œuvre sont le fruit d'une prise de conscience d'un contexte plus extrême, nécessitant donc une approche plus fine et des solutions plus spécifiques (puit dépressionnaire pour le bâtiment A). L'étude en soufflerie et les STD nous ont permis de tester des hypothèses et valider nos choix et réduire ainsi les risques de dysfonctionnement.
Toutefois, les deux cas montrent les mêmes limites: une variation substantielle de l'environnement proche (nouvelles constructions au vent du projet par exemple), modifiant en particulier la donnée vent en période chaude, pourrait impacter fortement le fonctionnement en ventilation naturelle et donc le confort.
C'est pour cette raison que nous allons tenter, dans le chapitre 4 de mieux cerner l'impact de ces abords, plus spécifiquement en milieu bâti et donc de l'urbanisme et de garantir la pérennité de ce contexte. Il apparait en effet essentiel d'améliorer nos connaissances et méthodes de travail pour limiter ou anticiper ces évolutions du contexte pour ne pas dégrader significativement les conditions initiales d'un bâtiment donné, fonctionnant en ventilation naturelle de confort. C'est bien à cette condition que l'on pourra assurer un confort optimal et le garantir dans le temps en minimisant l'usage des systèmes.

6 Bibliographie

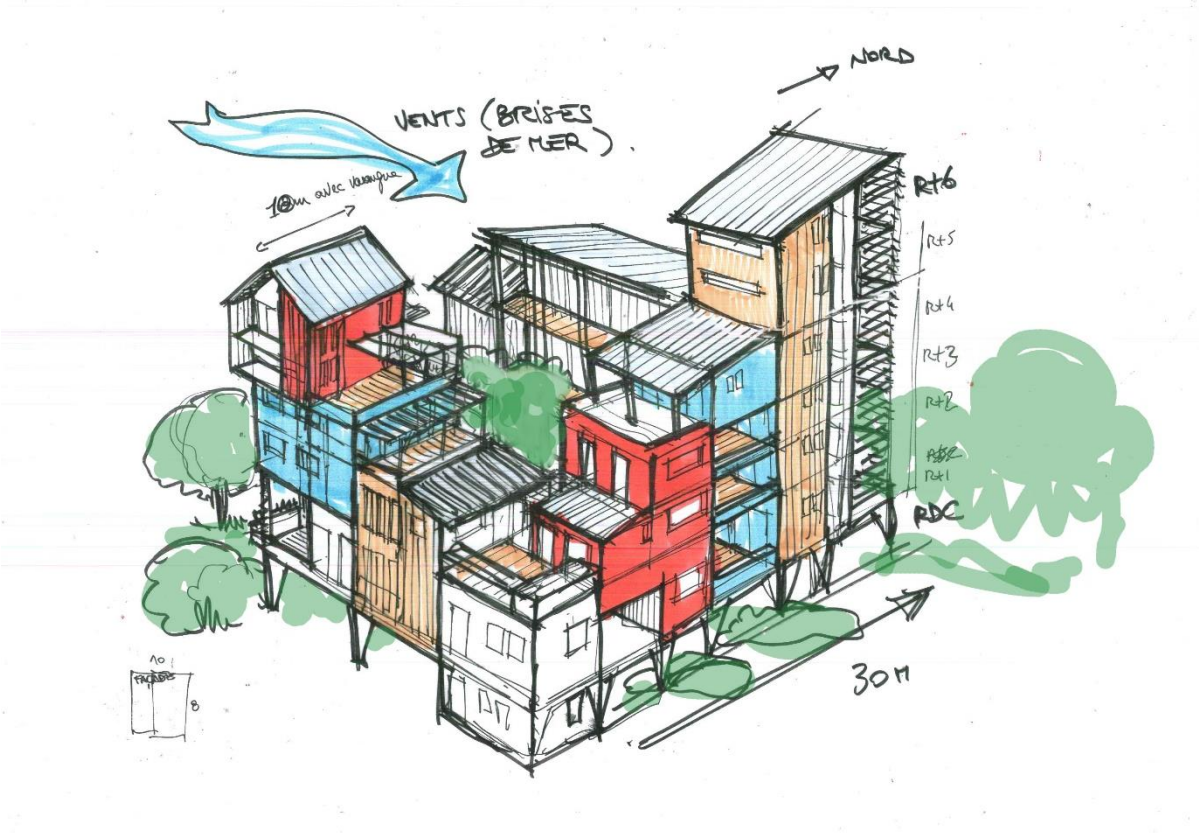
(ADEME 2010)	*ADEME. 2010. « guide_ecodom_plus_2010.pdf »* *Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France). 2007. Qualité environnementale des bâtiments: manuel à l'usage de la maîtrise d'ouvrage et des acteurs du bâtiment. Angers: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.*
(Anh-Tuan et al. 2011)	Anh-Tuan, Nguyen, Tran Quoc-Bao, Tran Duc-Quang, et Reiter Sigrid. 2011. « An investigation on climate responsive design strategies of vernacular housing in Vietnam - ScienceDirect ». 2011. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311001211?np=y.
(Bay et Ong 2006)	Bay, Joo-Hwa, et Boon Lay Ong, éd. 2006. Tropical Sustainable Architecture: Social and Environmental Dimensions. Amsterdam: Elsevier
(Bouyer et al. 2011).	Bouyer, Julien, Marjorie Musy, Yuan Huang, et Khaled Athamena. 2011. « Mitigating Urban Heat Island Effect by Urban Design: Forms and Materials », 19.
(Butera, Adhikari, et Aste 2014)	Butera, Federico, Rajendra Adhikari, et Niccolò Aste. 2014. Sustainable building design for tropical climates: principles and applications for eastern Africa. Nairobi: UN-Habitat.
(Coccolo et al. 2018)	Coccolo, Silvia, Jérôme Kämpf, Dasaraden Mauree, et Jean-Louis Scartezzini. 2018. « Cooling Potential of Greening in the Urban Environment, a Step Further towards Practice ». Sustainable Cities and Society 38 (avril): 543-59. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.019.
(Crawley et al. 2000)	Crawley, Drury B, Linda K Lawrie, Curtis O Pedersen, et Frederick C Winkelmann. 2000. « EnergyPlus: Energy Simulation Program ». ASHRAE Journal, 8.
(Dupont, Celestine, et Feuillard 1994).	Dupont, M., C. Celestine, et T. Feuillard. 1994. « Natural ventilation in a traditional house on a West Indies Island (Guadeloupe):: Field testing on site and in a wind tunnel ». Renewable energy 4 (3): 275–281.
(F Picgirard - J Gandemer 2012),	*F Picgirard - J Gandemer. 2012. « La ventilation naturelle en pratique ». ADEME.*
(Faggianelli 2014)	Faggianelli, Ghjuvan Antone. 2014. « Rafraichissement par la ventilation naturelle traversante des bâtiments en climat méditerranéen ». France: Université de Corse - Pascal Paoli.
(Fry et Drew 1974),	*Fry, Maxwell, et Jane Drew. 1974. Tropical architecture in the dry and humid zones. Huntington, N.Y: R. E. Krieger Pub. Co.*
(Gago et al. 2013)	Gago, E.J., J. Roldan, R. Pacheco-Torres, et J. Ordóñez. 2013. « The City and Urban Heat Islands: A Review of Strategies to Mitigate Adverse Effects ». Renewable and Sustainable Energy Reviews 25 (septembre): 749-58. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.057.
(Gandemer et Guyot 1976)	Gandemer, Jacques, et A. Guyot. 1976. « Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti ». Paris: Ministère de l'Equipement, Direction de l'Aménagement foncier et de l'Urbanisme.
(Garde et Adelard 2004).	Garde, François, et Laetitia Adelard. 2004. « Implementation and expérimental survey of passive design specfications used in new low-cost housing under tropical climates ». Energy and Buildings.

(Garde, Boyer, et Celaire 2000)	Garde, François, Harry Boyer, et Robert Celaire. 2000. « Elaboration d'un label de conception thermique des bâtiments dans les Départements d'Outremer français », 17.
(GhaffarianHoseini et al. 2014).	GhaffarianHoseini, AmirHosein, Umberto Berardi, Nur Dalilah Dahlan, et Ali GhaffarianHoseini. 2014. « What can we learn from Malay vernacular houses? » Sustainable Cities and Society 13 (octobre): 157-70. https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.008.
(Ghiaus et Allard 2005)	Ghiaus, C., et Francis Allard. 2005. « Natural ventilation of urban buildings - summary of URBVENT project ». In , 33. Santorini - Greece.
(Givoni 1994)	Givoni. 1994. « Buiding design principles for hot humid regions ». Renewable Energy, Elsevier Science Ltd, Vol5, part II: 908-16.
(Hirano et al. 2006)	Hirano, Tomoko, Shinsuke Kato, Shuzo Murakami, Toshiharu Ikaga, et Yasuyuki Shiraishi. 2006. « A Study on a Porous Residential Building Model in Hot and Humid Regions: Part 1—the Natural Ventilation Performance and the Cooling Load Reduction Effect of the Building Model ». Building and Environment 41 (1): 21-32. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.018.
(Hyde 1996).	*Hyde, R. 1996. Climate responsive architecture. London: E & F Spon, imprint of Chapman & Hall.*
(LPBS et IMAGEEN 2009)	IMAGEEN, et ESIROI. 2013. « Charte Mayénergie Plus - Charte Mayénergie.pdf ». Mayotte: ADEME. http://www.ademeoceanindien.fr/documents/mayotte/Energie/Ma%C3%AEtrise%20des%20consommations%20d%27%C3%A9nergie/Charte%20May%C3%A9nergie/Charte%20May%C3%A9nergie.pdf.
(Jiang et al. 2003)	Jiang, Yi, Donald Alexander, Huw Jenkins, Rob Arthur, et Qingyan Chen. 2003. « Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation ». Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (3): 331-53. https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00380-X.
(Krauss et al. 2005)	Krauss, G, B Lips, J Virgone, et E Blanco. 2005. « Modélisation sous TRNSYS d'une maison à énergie positive », 7.
(Liébard et Herde 2005)	Liébard, Alain, et André de Herde. 2005. Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable ; [en 368 fiches didactiques]. Paris: Observ'ER [u.a.].
(LPBS et IMAGEEN 2009)	LPBS, et IMAGEEN. 2009. « Rapport PERENE version 26 octobre 2009.pdf ». REGION REUNION.
(Mallick 1996)	Mallick, Fuad H. 1996. « Thermal Comfort and Building Design in the Tropical Climates », 7.
(Nestoras et al. 2017)	Nestoras, Antoniou, Montazeri Hamid, Wigo, Marina K.A Neophytou, Bert Blocken, et Mats Sandberg. 2017. « Building and Environment ». Building and Environment 14 (1): 69. https://doi.org/10.1016/0360-1323(79)90031-3.
(Olgyay et al. 2015)	*Olgyay, Victor, Aladar Olgyay, Donlyn Lyndon, Victor W. Olgyay, John Reynolds, et Ken Yeang. 2015. Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism. New and Expanded edition. Princeton: Princeton University Press.*
(Prianto et Depecker 2003)	Prianto, E, et P Depecker. 2003. « Optimization of Architectural Design Elements in Tropical Humid Region with Thermal Comfort Approach ». Energy and Buildings, 8.

(Terrin 2015)	*Terrin, Jean-Jacques, éd. 2015. Villes et changement climatique: îlots de chaleur urbains = Cities and climate change: urban heat islands. Collection La ville en train de se faire. Marseille: Parenthèses.*
(Tsoka, Tsikaloudaki, et Theodosiou 2017)	Tsoka, Stella, Katerina Tsikaloudaki, et Theodoros Theodosiou. 2017. « Urban Space's Morphology and Microclimatic Analysis: A Study for a Typical Urban District in the Mediterranean City of Thessaloniki, Greece ». Energy and Buildings 156 (décembre): 96-108. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.066.
(Tzonis, Stagno, et Lefaivre 2001)	Tzonis, Alexander, Bruno Stagno, et Liane Lefaivre, éd. 2001. Tropical architecture: critical regionalism in the age of globalization. Chichester ; New York : The Netherlands: Wiley-Academic ; C. Fonds.
(Weber et Yannas 2014)	Weber, Willi, et Simos Yannas, éd. 2014. Lessons from vernacular architecture. Earthscan. London ; New York: Routledge.

Chapitre 4

Nécessité d'un changement d'échelle, vers un urbanisme éolien



Croquis initial d'un ilot type- ZAC Cœur de Ville © LEU Réunion

Dans ce chapitre nous allons remonter la « chaine de ventilation naturelle » et voir comment essayer de garantir dans le temps, le bon fonctionnement en ventilation naturelle des bâtiments dans une ville ou un quartier de ville et ce à la lumière des contraintes et solutions abordées dans les chapitres précédents et au travers une étude de cas, la ZAC Cœur de Ville Possession.

Table des matières

1 Introduction 180
2 Urbanisme éolien – revue de la littérature 183
2.1 Problématique de la relation entre la ventilation d'une trame urbaine et d'un bâtiment dans cette trame. 183
2.2 Exemples de villes intégrant la donnée ventilation naturelle. 186
3 Documents d'urbanisme intégrant la ventilation naturelle (règlementairement ou sur la base de recommandations) 191
3.1 Exemple de Cairns – Queensland – Australie 191
3.2 Principe d'urbanisme pour les villes durables tropicales selon B. Stagno 193
3.3 Proposition de Golany pour la prise en compte des particularités de certains climats dans l'architecture et l'urbanisme.....194
3.4 Principes de conception des villes tropicales selon Schiller et Evans 194
3.5 Justification du cadre règlementaire approprié à l'introduction du « droit à la ventilation naturelle » 196
4 Conclusions des exemples étudiés 199
5 Méthodologie.....200
5.1 Données programmatiques 201
5.2 Données climatiques : 202
5.3 Données géographiques 202
5.4 Données règlementaires 202
5.5 Données d'organisation de l'équipe.....202
5.6 Données de stratégie d'aéraulique urbaine 205
6 Contexte.....205
6.1 Contexte programmatique 205
6.2 Contexte géographique et climatique 207
6.3 Contexte réglementaire : le PLU.....212
6.4 Contexte de stratégie aéro-climatique 212
7 Résultats et discussion. Superposition de la stratégie aéro-climatique et de la réflexion urbaine : 215
7.1 Première étape : Définition de scénarii urbains initiaux Juillet 2011 :.....215
7.2 Deuxième étape : Définition d'une stratégie aéro-climatique à l'échelle de la ZAC : Septembre 2011 217
7.3 Troisième étape, définition d'une stratégie aéroclimatique à l'échelle de l'ilot et définition des interactions entre ilots et forme bâties, décembre 2011 219
7.4 Quatrième étape, définition d'une stratégie aéroclimatique à l'échelle des bâtiments. 220

7.5 Cinquième étape : Transcription réglementaire, la révision du PLU et les OAP :..224
8 Conclusion 231
9 Bibliographie 235

1 Introduction

Les chapitres 1,2 et 3, ainsi que la littérature, nous ont montré l'influence et l'importance du contexte dans l'architecture bioclimatique tropicale. L'utilisation de la ventilation naturelle, quelle que soit la solution envisagée: ventilation traversante, puit dépressionnaire, écope…, nécessite, c'est une évidence, des ouvertures vers le milieu extérieur. La nature, la qualité, le climat, la typologie de ce milieu peuvent donc dégrader ou améliorer les performances des bâtiments. (Wissam, 2011).

Fort de ce constat, il apparait essentiel de consacrer la dernière partie de ce travail à la prise en compte de ce contexte et en particulier les variables extérieures que l'on pourrait y introduire, c'est-à-dire les aménagements proches ou lointains en un mot l'urbanisme. La nécessité d'un changement d'échelle apparait indispensable pour préserver les qualités d'un bâtiment fonctionnant en ventilation naturelle de confort. Les enjeux énergétiques sont aussi à prendre en considération pour proposer des modèles urbains moins consommateurs

Cette dimension avait été très rapidement intégrée par les premiers colons lorsqu'ils ont commencé à organiser, les comptoirs, les villes où ils projetaient de développer leur implantation. Dans son ouvrage (Chang, 2016) Chang cite le rapport de Simpson "the sanitary conditions of Singapore, 1907 ». *« Dans son manuel, principe d'assainissement tropical, Simpson notait que les rues devaient être larges, droites, et se couper à angle droit, avec les avenues principales orientées dans la direction des vents dominants et sains »*. On retrouve la même préoccupation hygiéniste, transcrite ici par le besoin de privilégier une bonne ventilation urbaine, que pour la conception des bâtiments à l'époque.

Cette approche a aussi été développée par rapport à l'influence de l'ensoleillement sur le confort urbain (Harzallah, 2007) et son impact éventuel sur la conception des villes (voir Figure 4- 1).

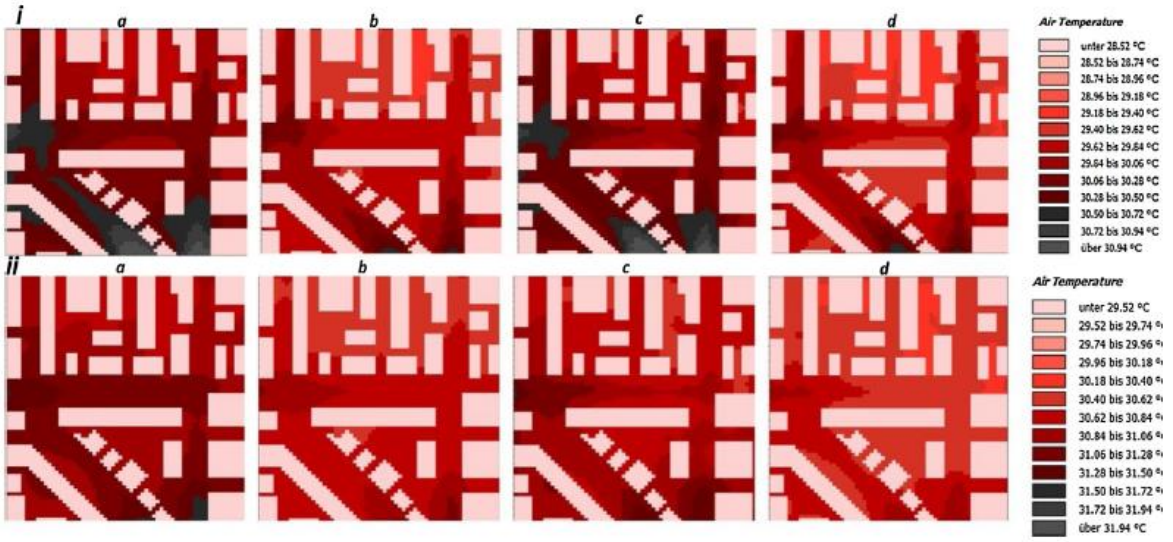


Fig. 10. Absolute values of air temperature distribution at (i) 12:00 and at (ii)16:00 for the four case studies: (a) current condition; (b) use of cool materials; (c) additional vegetation; (d) combination of cool materials and additional vegetation.

Figure 4- 1: Illustration issue de (Harzallah 2007) montrant l'influence de l'orientation des rues (canyons urbains) sur la température de l'air.

Elle y montre l'impact de l'urbanisation croissante sur le micro climat urbain. L'influence des matériaux de sol (asphalte, pavé de béton), de la végétation et des canyons urbains sur l'augmentation de la température de la ville et le confort des piétons y est évaluée.
G. H. Pingusson architecte français, dans ("Architecture d'Aujourd'hui n°3," 1945)., résume la problématique climat –architecture comme suit : *« les conditions de séjour et de travail peuvent être grandement améliorées par un renouvellement constant de l'air ambiant, ce qui peut être obtenu soit par un conditionnement d'air très poussé (solution d'ingénieur), soit par une heureuse disposition des bâtiments sur le sol (solution d'urbaniste) ou la conception du logis (solution d'architecte) les deux dernières utilisant les vents légers régnant en permanence à la colonie »* Il définit une nouvelle appellation de ce travail : *« **l'architecture éolienne** »* Il est intéressant de noter la dissociation entre la solution d'urbaniste, la solution d'architecte et l'apparition de l'appellation d'architecture éolienne toujours sous couvert de préoccupation hygiéniste, liée à la santé et sous tendue par la nécessité d'amélioration du confort de l'habitat et du travail.
On ne peut non plus ignorer la nécessité de densification des villes. Steffen Lehmann (Lehmann, 2010) dans son livre « The Principles of green urbanism » (Les Principes de l'Urbanisme Vert) a montré qu'une densité inférieure à 70 logements à l'hectare n'est pas viable du point de vue des transports publics, de la production énergétique et de la mixité des usages. Cependant avec des densités élevées la forme de la ville doit être plus compacte afin de faciliter l'accès aux dispositifs environnementaux tels que le soleil et la ventilation. Il est donc fondamental d'envisager, entre autre, la persistance de l'efficience de la ventilation naturelle dans un contexte de ville dense reprenant les principes d'un urbanisme vert.
Kean Yeang (Yeang, 2008) souligne ces points dans son livre « A manual of eco design ».
A Hong Kong, dans le livre « Urban Climate Challenges in The Tropics » « Les défis du climat urbain dans les tropiques » Ng (Emmanuel, 2016) aborde la problématique de la ventilation des villes tropicales. Il s'intéresse aussi à l'accès à l'énergie solaire dans les villes denses dans l'ouvrage « Dense Cities in The Tropical Zone, in Solar Energy At Urban Scale » « Les villes denses en zone tropicale, l'énergie solaire à l'échelle urbaine » (Beckers, 2012). Energie solaire et ventilation naturelle, sont donc au cœur de la conception des villes durable d'aujourd'hui et de demain.
L'influence de l'organisation spatiale des villes dans le confort a aussi été abordée par Yuan Shi (Shi et al., 2016) dans un article qui présente une approche pragmatique de la cartographie de la distribution spatiale microclimatique urbaine qui peut être référencée par les architectes et les concepteurs urbains pour soulever des considérations climatiques afin de concevoir de meilleures villes.
Ceci a amené notre questionnement :
Dans quelle mesure un « **urbanisme éolien** » pourrait se concevoir et quel impact aurait-il sur les méthodes conceptuelles et l'organisation urbaine en découlant ? La dernière partie de ce travail propose de réfléchir comment une conception urbaine appropriée peut favoriser ou optimiser le potentiel de ventilation naturelle des bâtiments constituant cet ensemble et commet garantir ce potentiel dans le temps?
Nous chercherons dans un premier temps, dans la littérature, des exemples, quels documents d'urbanisme sont importants à considérer dans le contexte français et les enseignements à en tirer. Dans un second temps, nous analyserons un projet en cours de réalisation la ZAC (Zone d'Aménagement Concertée) Cœur de ville Possession. Nous verrons comment cette notion d'urbanisme éolien a été prise en compte, de la conception, à la transcription réglementaire. Dans un troisième temps, nous verrons comment la pérennité de ces dispositifs a pu être envisagée.

Nous sommes urbanistes, paysagistes et mandataire de l’équipe d’étude avec le bureau d’étude LEU Réunion de ce projet dans lequel une démarche innovante tendant à aboutir à la définition d’une ville nouvelle tropicale a été initiée. Celle-ci devant intégrer les conditions préalables au confort en permettant un urbanisme définissant un nouveau « droit à la ventilation naturelle » au travers un « urbanisme éolien ».

2 Urbanisme éolien – revue de la littérature

2.1 Problématique de la relation entre la ventilation d'une trame urbaine et d'un bâtiment dans cette trame.

La théorisation de l'urbanisme en fonction de paramètres climatiques n'est pas neuve. Elle a souvent été basée sur la position du soleil par rapport aux rues et bâtiments, (Harzallah, 2007), mais aussi par rapport aux brises et vents dominants.
A la genèse de l'architecture et de l'urbanisme, au 1er siècle avant Jésus-Christ, Vitruve, dans son traité « de architectura », (Vitruvius and Perrault, 1979) proposait déjà d'organiser la ville sur une base circulaire dont les huit voies principales seraient déterminées par les huit vents dominants (voir Figure 4- 2).

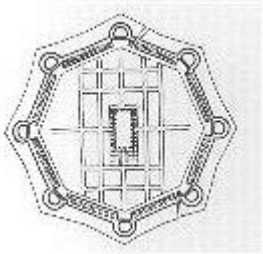


Figure 4- 2: Plan de ville, (©Vitruve « de architectura »)

Ce concept a fait l'objet depuis de publications et de théorisations. Au début du 20ème siècle, Augustin Rey, à la lumière de l'aéronautique naissante comparait les villes à de vastes corps "parcourus par des vaisseaux d'air" (Ramirez, 2014). Dans les années 1950 Olgyay (Olgyay et al., 2015) comparait un village traditionnel Africain en zone aride et en zone tropicale (voir Figure 4- 3). Le premier, plus regroupé, favorisait l'ombrage des rues et l'effet de masse. Le second dispersé, optimisait le potentiel de ventilation des habitats en minimisant les gênes d'une case à l'autre il cite : « *the winds are welcome* ». « Le vent y est bienvenu ». En effet on perçoit par la disposition des cases les unes par rapport aux autres le potentiel de

Figure 4- 3: Photos village en zone aride et chaude (à gauche), village en zone humide et chaude (à droite) (© Olgyay « Design with climate »)

circulation d'air entre celles-ci, par opposition à la ville dense des zones arides qui utilise la stratégie de la fraicheur assurée par l'ombre portée des bâtiments des uns sur les autres.

Figure 4- 4: Dakar, plan de lotissement Charpy (documents réunis par) la fondation de Dakar, Paris Larose 1958.

La création des villes coloniales n'a pas échappé à ces règles, ainsi pour Dakar au Sénégal, Soulillou (Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993) explique le choix du gouverneur Pinet-Laprade : « En proposant d'établir des canalisations le long des rues en orientant les voies en fonction des brises, en implantant les édifices militaires et sanitaires dans les «zones les plus salubres ». Pinet-Laprade ne fait que reprendre des principes anciens similaires aux recommandations de Vitruve. » (Voir Figure 4- 4)

On note que ces préoccupations de recours à la ventilation naturelle relevaient des théories hygiénistes de la fin du 19ème siècle début 20ème ou le danger semblait venir des miasmes présents dans l'air et responsables, pensait-on, des maladies tropicales. On retrouve dans la conception des bâtiments (voir chapitre 1) les mêmes préoccupations et justifications du recours à la ventilation. C'est un questionnement proche de celui-ci, les effets de la ventilation dans les canyons urbains (Chan et al., 2003) et, entre autre, la dispersion de polluants dans les villes, qui a aussi fait l'objet de littérature récente, (Ghiaus et al., 2006) et qui a permis de mieux comprendre l'action du vent dans les villes denses (Ng, 2009). Ces études s'appuient sur le Wind engineering, discipline vielle d'une cinquantaine d'année qui repose sur les principes de la mécanique des fluides appliqués à des objets (infrastructures, ponts ou bâtiments, isolés ou groupés) avec l'aide d'étude en soufflerie physique ou numérique (CFD) (Blocken, 2014).

Toutefois, on perçoit rapidement certaines limites de ces exemples. Ils se préoccupent du confort urbain (Ahmad et al., 2005) avec des simulations en soufflerie physique ou numérique (Germano, 2006), mais pas du confort en ventilation naturelle des bâtiments induit par l'organisation de la ville (voir introduction la « chaine de la ventilation naturelle »). Ce point est pourtant fondamental, en effet, compte tenu de la pression démographique, il est généralement admis que la population urbaine va croitre de manière significative (voir Figure 4- 5). La question du potentiel de confort thermique induit par la ventilation naturelle va devenir cruciale pour la consommation énergétique en milieu tropical et donc pour l'impact carbone induit par ce développement. Des études paramétriques ont été menées en ce sens pour donner des clés et méthodes de conception de plan directeur (Ignatius et al., 2015) à partir de plusieurs facteurs : énergie, ventilation urbaine, température extérieure sous les tropiques. En

effet, plus on optimisera la ventilation naturelle de confort (entre autres facteurs), moins on aura recours à des systèmes actifs, énergivores, pour atteindre ce confort en milieu urbain.

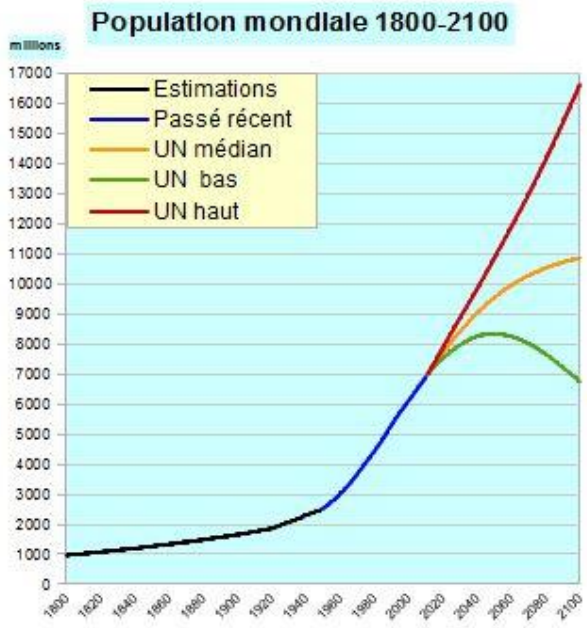


Figure 4- 5: Graphique de scénarios possible d'évolution de la population mondiale – (© Nations Unies - Projections de population 2013 ; 1800-1950 : estimations US Census Bureau)

La littérature est assez peu fournie sur ce sujet. Une étude récente :(Ahmad Zaki et al., 2012) aborde la corrélation entre le coefficient de pression Cp et la densité de l'ilot, mais reste au niveau théorique sans exemple d'application concrète. Dans Natural ventilation of urban buildings (Ghiaus and Allard, 2005) , les auteurs explicitent une méthode de conception architecturale pour évaluer le potentiel d'un bâtiment neuf ou à réhabiliter en fonction du potentiel du site et par comparaison avec des bâtiments existants dont le potentiel est connu. Il rappelle qu'il faut à la fois un site et un bâtiment favorables pour développer une stratégie de ventilation naturelle. On trouve par ailleurs des exemples théoriques d'optimisation du potentiel de ventilation d'une ville ou d'une trame urbaine (Hang and Li, 2010),de l'impact des arcades sur la ventilation (Wen et al., 2017), de l'influence de la variation des hauteurs d'immeubles (Chen et al., 2017) mais pas d'exemples appliqués sur des projets réels réalisés ou en cours. Dans (Mirzaei et al., 2015), l'auteur se préoccupe à juste titre de la relation entre température extérieure et confort thermique intérieur en fonction de la constitution de la trame urbaine. A cette image il apparaitrait intéressant d'étudier la relation entre un potentiel de ventilation urbain et de celui d'un logement dans un bâtiment situé dans cette trame.
Dans l'analyse d'exemples récents d'urbanisme, se présentant comme environnementaux ou bioclimatiques, nous allons tenter d'en trouver des applications concrètes et d'en tirer des enseignements.

2.2 Exemples de villes intégrant la donnée ventilation naturelle.

2.2.1 Masdar city

Masdar city (voir Figure 4- 6) est une ville nouvelle implantée en plein désert dans les Emirats Arabes Unis. Les travaux de construction, initiés en 2008 sont encore en cours. L'ambition est d'y développer une ville exemplaire au niveau environnemental avec un impact minimal, en climat chaud et aride.
L'architecture de la ville croise les technologies nouvelles et l'architecture traditionnelle arabe. Elle est également adaptée à l'environnement de la ville. Sa conception, par l'agence Foster and Partners intègre notamment :

- Des ruelles étroites et ombragées, rafraichies par un réseau de cours d'eau ;
- Des « couloirs » ventés traversant la ville de part en part pour une aération naturelle afin de favoriser l'apparition d'un « microclimat » ;
- Un plan général de type traditionnel, carré, entouré de murs destinés à protéger des vents chauds du désert ;
- Des constructions basses et équipées en panneaux solaires sur les toits utilisant la climatisation naturelle ;
- Des fenêtres reproduisant le principe des moucharabiehs.

Figure 4- 6: Vue aérienne de Masdar City

Les éléments décrits ci-dessus rapportent une conception prenant en compte une certaine forme de ventilation naturelle. Il s'agit ici du confort des espaces extérieurs, mais pas de l'interaction entre espaces extérieurs et bâtiments, ni des bâtiments entre eux, pour l'optimisation de la ventilation. L'utilisation des tours à vent y est mise en avant. Ces dispositifs traditionnels appelés aussi bagdirs, (A'zami, 2005) ont été développés dans les régions arides de l'Iran il y a des siècles et permettent de ventiler des bâtiments sous ces climats chaud et secs. Dans le cas de Masdar, ces bagdirs sont utilisés pour ventiler les espaces extérieurs et en améliorer le confort.

2.2.2 Hong Kong

La ville de Hong Kong, suite à l'épisode du SRAS, s'est interrogée sur la définition d'un urbanisme favorisant une bonne ventilation de la ville, malgré un faible potentiel de ventilation naturelle. Elle a commandé une étude ayant débouché sur l'adoption de règles à respecter (AVA) (Air Ventilation Assesment) à destination des promoteurs et porteurs de projets pour optimiser son urbanisation future (Ng, 2009). On retrouve ici les préoccupations hygiénistes de la période coloniale au travers des solutions favorisant la dispersion des polluants et autres germes, améliorant la qualité de l'air par la ventilation naturelle de la ville (voir Figure 4- 7). Cet aspect de la ventilation des villes appliqué à la dispersion des polluants a aussi fait l'objet d'une étude sur un cas réel à Nicosie, en comparant la simulation en soufflerie avec les outils LES et RANS (Sandberg, 1979).

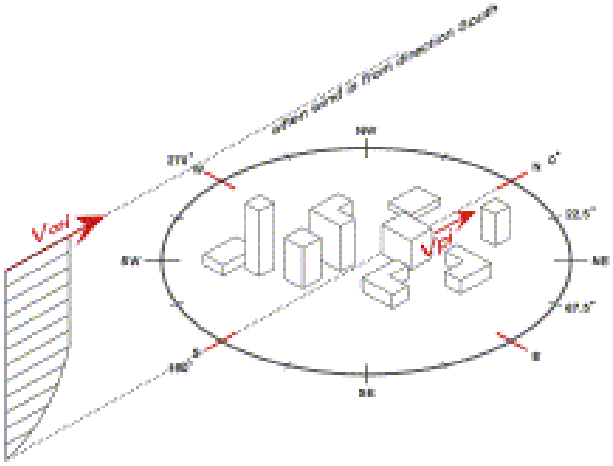


Figure 4- 7: Illustration des préconisations d'organisation urbaine de la ville de Hong Kong pour favoriser la ventilation naturelle

2.2.3 Zenata

Le projet de Zenata est une ville nouvelle située au Maroc au Nord-Ouest de Casablanca et est présenté comme une éco cité. Elle se base, entre autre, sur le concept de trame aéraulique:
« Le principe de la ville ventilée est au cœur de plusieurs innovations urbaines majeures, permettant au territoire de bénéficier d'atouts naturels favorisant l'optimisation des ressources. » ("Eco-cité Zenata," 2016) Aussi, une trame aéraulique oblique, suivant le sens des vents dominants (Nord-Ouest, Sud-Est) de la région, a été modélisée. Elle permettra un rafraichissement naturel du territoire pendant la période estivale. Comme le précise le dossier consulté, l'objectif est de rafraîchir le territoire et donc d'améliorer le confort des espaces extérieurs. Il n'est cependant pas fait mention d'un objectif recherché pour le confort des logements et la trame urbaine proposée n'apparait pas en mesure d'y apporter des solutions évidentes, bien au contraire. Sur la simulation (voir Figure 4- 8) on perçoit une homogénéisation des pressions une fois le premier front bâti passé et ainsi le

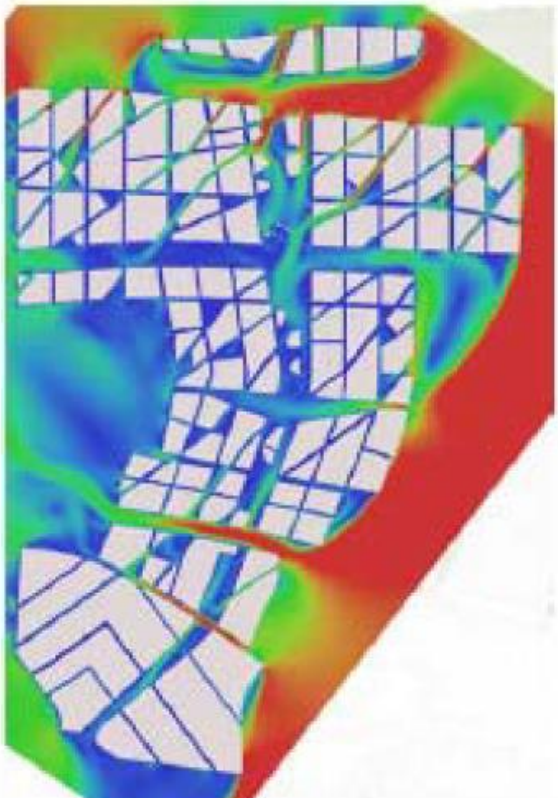


Figure 4- 8: Plan, modélisation trame aéraulique Zenata, (© dossier de presse Zenata)

faible potentiel résultant pour les bâtiments couleur et donc pressions équivalentes de part et d'autre d'un ilot).
Ce concept basé sur une trame urbaine dense, s'inspire de la ville traditionnelle Marocaine, à l'image de ses médinas, ou l'étroitesse des venelles permettait de se déplacer à l'ombre, protégé des ardeurs du soleil (voir Figure 4- 9), mais pour laquelle la ventilation naturelle traversante n'était pas un objectif en soi.

Figure 4- 9: Vue aérienne, Médina de Fès, (© Google Earth)

2.2.4 Le concept de la ville tropicale selon Thay Keng Soon.

D'une manière plus théorique, Thay Keng Soon (Tzonis et al., 2001) , développe le concept de la ville tropicale. Il est basé sur une densification importante avec un FSR supérieur à 5 (voir Figure 4- 10). L'intention est de faire une ville connectée, mixte, peu énergivore, partant

Figure 4- 10 :Maquette concept ville tropicale, Tropical Architecture : critical regionalism in the age of globalization (©Tzonis et Al. 2001)

des principes connus de la nécessité de préserver les espaces naturels et donc de limiter l'expansion urbaine, tout en proposant une ville ou nature (artificialisée) et activité humaine coexisteraient. La préoccupation de l'utilisation de la ventilation naturelle y est, là encore, évoquée, sous la forme d'une orientation des rues. Ainsi celles-ci sont « orientées par rapport à un axe Nord/Sud afin de faciliter le courant d'air pendant les moussons de Nord Est et Sud-Ouest » (Tzonis et al., 2001). Il n'est pas donné plus de précisions sur l'effet escompté de cette orientation au vent, même si l'auteur souligne l'importance de son utilisation dans des latitudes ou le potentiel de ventilation en période chaude s'appuie sur des vents faibles.

2.2.5 Exemple de prise en compte globale : la ville nouvelle de Sidi Sayeh.

En 2010 une ville nouvelle de 70 000 habitants (voir Figure 4-21) développant une stratégie aéroclimatique en milieu chaud et sec en Lybie, a été étudiée par Day architectes, avec l'assistance du laboratoire Eiffel.

Figure 4- 11: Vue aérienne ville nouvelle de Sidi Sayeh – (© Day architectes – Laboratoire Eiffel conception aéroclimatique)

« Dans le cadre du projet de construction d'une ville en Lybie « Sidi Sayeh », le demandeur a chargé Aérodynamique Eiffel de conduire une étude, sur la stratégie bioclimatique avec une validation en soufflerie. L'objectif est une urbanisation aérée et une ventilation naturelle de l'habitat (voir Figure 4- 22) efficace. Compte tenu de la complexité du projet, l'étude a été faite à trois échelles: échelle urbaine, échelle des ilots et l'échelle des maisons.Le travail a eu lieu de Janvier à Mars 2010 au Laboratoire Aérodynamique Eiffel.» (Blanchard et al., 2010).

Il est intéressant de noter la prise en compte de trois échelles, préoccupation qui rejoint la notion de la « chaine de ventilation naturelle » que nous avons développée. L'étude été faite par simulation en soufflerie physique à retour libre par le hall.

La méthode utilisée par l'étude d'Eiffel définit les conditions d'une bonne irrigation pour ce

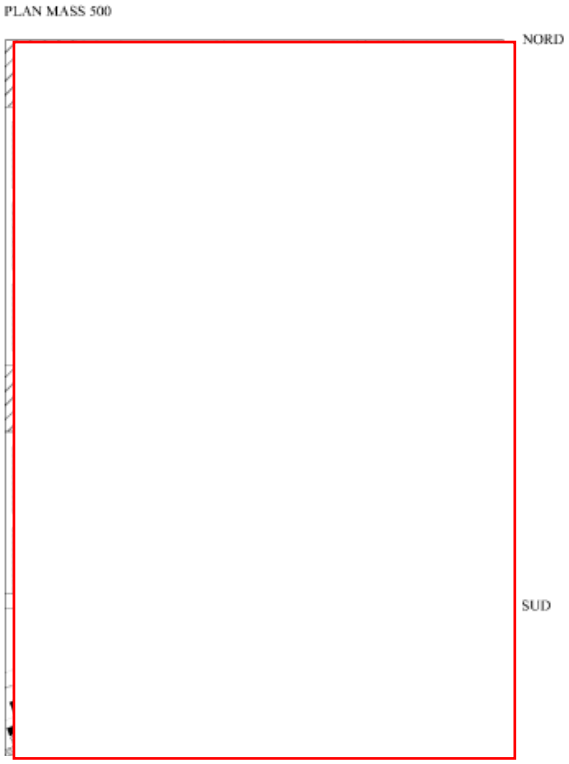


Figure 4- 12: Plan de masse tour et pare sable (© Day architectes)

cas particulier : « l'effet dynamique du vent doit toujours être supérieur à l'effet thermique de convection naturelle (afin d'empêcher toute stratification thermique) »(Blanchard et al., 2010). Les études ont été menées à l'échelle de l'ilôt, puis du batiment dans les ilots (tours et maisons) et enfin d'une cellule (voir Figure 4- 23). Elles ont permis de déterminer les vitesses et ainsi les coefficients locaux de vitesse d'air en reproduisant la rugosité périphérique et l'architecture interne des maisons. Ceci rejoint notre propos sur la chaine de la ventilation naturelle (voir introduction).

Figure 4- 13: Les trois échelles de maquettes étudiées (© Laboratoire Eiffel)

Au préalable, un travail similaire avait montré le bon fonctionnement du plan de masse (échelle élargie), il est aussi validé à l'échelle des ilots et au final il montre l'efficacité à l'échelle des maisons en utilisant la ventilation naturelle, avec un certain nombre de recommandations (double façades pour la protection solaire et éviter l'effet de cheminée, optimisaiton de la perméabilité des murs, alimenation en air frais par la cage d'escalier, puit de ventilation…). .
On se trouve ici dans un contexte conceptuel comparable à l'opération Cœur de ville Posession que nous développons ci-après. Il subsiste cependant deux différences notables :

- Le contexte climatique qui conduit à des stratégies formelles différentes et à la prise en compte de dispositifs aussi différents (définition de dispositifs de protection des vents de sable) ;
- Le niveau de contrôle du résultat, pour Sidi Sayeh, les urbanistes étaient aussi les architectes et n'avaient donc pas en charge la transcription réglementaire puisqu'ils avaient la maitrise d'œuvre des batiments (les maisons) dans leur mission.

La philosophie reste la même, prendre en compte le contexte à toutes les échelles et développer des stratégies passives de la macro (l'urbanisme) à la micro échelle (l'intérieur du logement).

2.2.6 Conclusion de ces exemples :

On constate une prise en compte depuis les temps les plus anciens avec Vitruve, jusqu'à nos jours, de la problématique de l'usage de la ventilation naturelle des villes. On y voit l'importance qu'elle a dans le confort urbain, l'évacuation des polluants. On peut noter toutefois que la ventilation naturelle des bâtiments dans cette trame urbaine n'y est pas évoquée, sauf pour Sidi Sayeh. On sait pourtant (voir chapitres précédents), qu'elle peut influer directement sur le confort de ces derniers et en particulier sur la possibilité d'utiliser la ventilation naturelle à cette fin.

3 Documents d'urbanisme intégrant la ventilation naturelle (règlementairement ou sur la base de recommandations)

Dans cette section nous allons examiner différents documents faisant référence à la prise en compte de la ventilation naturelle sous la forme réglementaire ou de recommandations.

3.1 Exemple de Cairns – Queensland – Australie

Au niveau réglementaire, on peut relever une approche intéressante à Cairns, Queensland Australie, d'intégrer la notion de spécificité de la ville tropicale dans un règlement d'urbanisme (voir Figure 4- 11).
La ville de Cairns située en zone tropicale, au Nord de l'Australie, s'est dotée d'un nouveau règlement d'urbanisme dans le quel apparait la notion de tropicalité et la prise en compte de cette spécificité dans son règlement d'urbanisme. ("Cairns plan - Planning Scheme policy - Tropical Urbanism," 2016)

SC6.16.1 Purpose of the planning scheme policy

(1) The purpose of this planning scheme policy is to:
- (c) provide context and guidance for the tropical urbanism, 'city in a rainforest' and qualities of good urban places provisions in the planning scheme
- (d) provide guidance for satisfying assessment criteria in the planning scheme, in particular the provisions of the City centre local plan code; and the Building height overlay code; and
- (e) identify information that Council may request or that may be required for a development application.

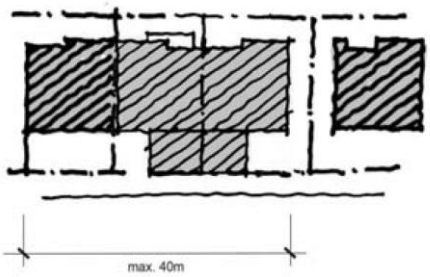


Figure 4- 14: Objet de la réglementation urbaine et illustration graphique, (© Cairns Plan 2016)

Comme on peut le voir noté, la référence à : *« la ville dans une forêt tropicale »* positionne dès l'introduction la volonté d'intégrer la référence au contexte climatique et géographique dans le document. Plus loin il y est reprécisé : *« A Cairns, la relation entre les formes bâties, la planification urbaine et le paysage est exprimée comme un urbanisme tropical et est un facteur définissant l'identité de Cairns ».*Cela se traduit par la volonté affirmée d'intégrer le paysage tant horizontal que vertical, c'est-à-dire prenant place en façade des bâtiments, sur des terrasses…L'urbanisme tropical y est défini de manière claire (voir Figure 4- 12) :

SC6.16.2.2 Tropical Urbanism

(1) Tropical urbanism is the integration of landscaping and tropical design elements into the built environment. Development that expresses Tropical urbanism incorporates:
- (a) Shelter from sun and rain;
- (b) A contrast of light and shade;
- (c) Sufficient spaces around and between buildings;
- (d) Minimisation of radiant heat and heat island effects;
- (e) Air circulation, breeze permeation and passive cooling;
- (f) Generous outdoor living spaces with large window and balcony openings;
- (g) Generous floor to ceiling heights;
- (h) High quality landscaping;
- (i) Quality public and private spaces that proliferate and enliven the urban form; and
- (j) Passive design that responds to the tropical climate.

Figure 4- 15: Définition de l'urbanisme tropical, (© Cairns Plan 2016 1)

SC6.16.3.2 Separation and setbacks

(1) Separation between buildings/towers and appropriate setbacks from boundaries is essential to achieving:
- (a) privacy and amenity for residents and occupants of the development and adjoining developments;
- (b) sufficient area to provide deep landscaping;
- (c) access to natural light and ventilation;
- (d) the retention of views lines through to the mountains and ocean; and
- (e) the appearance of distinct buildings rather than the appearance of continuous buildings which blend into each other forming a 'wall of buildings'.

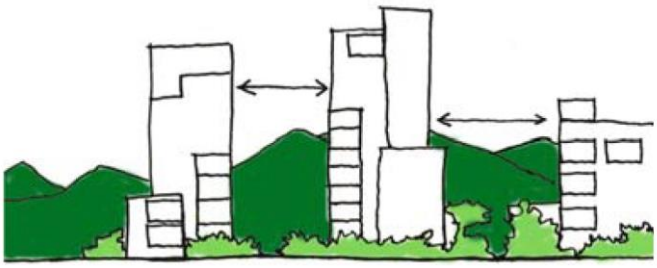


Figure 4- 16: Règle d'implantation des bâtiments, vue en élévation, (© Cairns Plan 2016 1)

Sur la Figure 4- 13 on trouve des références à des concepts favorisant la ventilation naturelle, la gestion de l'espace inter bâtiments (élévation) et la circulation de l'air avec la perméabilité au vent et le refroidissement passif (préconisation écrite).

Enfin, la liste des documents à remettre pour l'obtention d'un permis de construire mentionne (voir Figure 4- 14): « une analyse de site montrant comment le design est orienté

(f) Site analysis diagrams showing how the design is oriented to local sun and wind conditions.

Figure 4- 17: extrait de la liste des documents à fournir (© Cairns Plan 2016 1)

par rapport aux conditions locales d'ensoleillement et de vent ».
Ces éléments marquent très nettement une préoccupation nouvelle, en particulier dans l'intégration du paysage horizontal et vertical, dans la conception de la ville et aussi de la prise en compte de l'importance de la ventilation naturelle. La finalité n'est toutefois pas clairement établie.

3.2 Principe d'urbanisme pour les villes durables tropicales selon B. Stagno

Bruno Stagno et Jimena Ugarte dans (Stagno and Ugarte, 2006) évoquent l'usage de la ventilation naturelle pour le design urbain « pero tanbien es un recurso para el diseno urbano », sans proposer de méthodologie plus poussée (voir Figure 4- 15). La référence à l'urbanisme se fait ici davantage par rapport à des recommandations pour les bâtiments constituant la ville ;

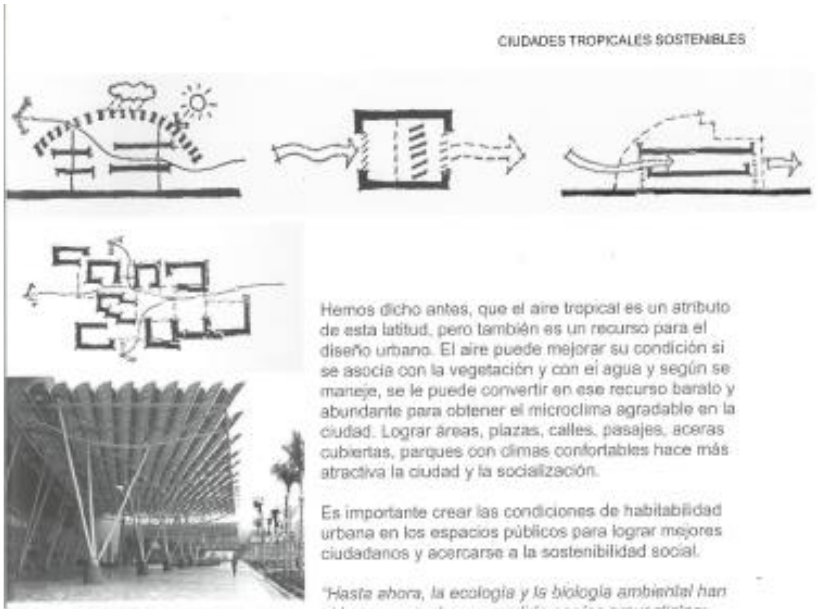


Figure 4- 18: Schéma et photos, Piste d'urbanisme bioclimatique – Ciudades Tropicales Sustenibles (© Stagno and Ugarte, 2006, p. 229)

3.3 Proposition de Golany pour la prise en compte des particularités de certains climats dans l'architecture et l'urbanisme

La proposition de Golany, reprise dans la thèse de Morgane Colombert (Colombert, 2010), (voir Figure 4- 16) est aussi explicite sur la nécessité de favoriser les mouvements d'air et favoriser la ventilation, mais là encore c'est pour favoriser la ventilation naturelle de la ville et éviter sa surchauffe.

Annexe 5 Proposition de Golany (1996) pour prendre en compte les particularités de certains climats dans l'architecture et l'urbanisme

Tableau A 7 : Profils climatiques des principaux climats, problèmes associés, et réponses architecturales ou urbaines offertes conseillées (Golany, 1996).

Principaux climats, exemple	Profils basiques	Problèmes majeurs	Réponse basique architecturale ou urbaine	Forme urbaine préférée
Chaud et humide (zone équatoriale)	Chaud toute la journée et pour toutes les saisons avec une amplitude thermique faible Forte pluie Plus de confort à une altitude élevée	Chaleur excessive Humidité élevée	Ventilation : extrémités ouvertes et forme dispersée Rues largement ouvertes pour favoriser les mouvements du vent Dispersion des grands bâtiments pour favoriser la ventilation Variation des hauteurs de bâtiments Espaces larges et cependant ombragés Zones d'arbres permettant d'avoir de l'ombre	Forme dispersée avec des extrémités ouvertes pour favoriser la ventilation

Figure 4- 19: Extrait proposition de Golany pour la prise en compte des particularités de certains climats dans l'architecture et l'urbanisme.

3.4 Principes de conception des villes tropicales selon Schiller et Evans

Dans ce document, les auteurs Schiller et Evans rappellent : « Un développement urbain durable dépends de décisions prises à trois niveaux : urbain, architectural et de détails constructifs ».(Mohsen M. and sabah, 2011). On voit ici (voir Figure 4- 17 et Figure 4- 18) une forme plus générale de la « chaîne de la ventilation naturelle » explicitée précédemment.
Les recommandations s'attachent bien ici à proposer des bâtiments fonctionnant en ventilation naturelle, Le document précise bon nombre de recommandations judicieuses en climat tropical. La Figure 4- 19 illustre celles concernant les implantations bâties en fonction de la densité construite. Les principes sont pertinents mais peu explicites quantitativement.

Figure 4- 20: Croquis, un tissu urbain perméable au mouvement de l'air (design guidelines for warm humid cities) (© Schiller et Evans)

Figure 4- 21: Coupe de principe : des bâtiments perméables au mouvement de l'air (design guidelines for warm humid cities) (© Schiller et Evans)

Figure 4- 22: Croquis perspectifs, recommandations pour bâtiments hauts, moyens et bas (design guidelines for warm humid cities) (© Schiller et Evans)

Cette série d'exemples illustre bien la préoccupation de la prise en compte de la ventilation naturelle dans une ville ou un règlement d'urbanisme. Par contre le lien avec la ventilation naturelle des bâtiments se trouvant dans cette ville ou ce quartier n'est pas évoqué ou seulement avec des principes non quantifiés.

3.5 Justification du cadre règlementaire approprié à l'introduction du « droit à la ventilation naturelle »

Il semble intéressant d'envisager le choix du cadre réglementaire le plus approprié à l'introduction du « droit à la ventilation naturelle » dans les textes utilisés en France.
Il se trouve que la transcription dans les documents d'urbanisme de mesures pour influer sur le climat urbain a fait l'objet d'une analyse dans la thèse de Morgane Colombert (Colombert, 2010). Elle y précise que c'est à l'échelle du PLU que cette transcription est la plus efficace parce qu'elle est ainsi opposable aux tiers.
Pour rappel les trois échelles règlementaires urbaines en France sont ;

- Le SCoT (Schéma de Cohérence Territoriale), à l'échelle d'une micro région ;
- Le PLU (Plan Local d'Urbanisme), à l'échelle d'une commune ;
- Les ZAC (Zones d'Aménagement Concerté), à l'échelle d'un quartier.

Le SCoT :
« Le Schéma de Cohérence Territoriale est l'outil de conception et de mise en œuvre d'une planification stratégique intercommunale, à l'échelle d'un bassin de vie ou d'une aire urbaine, dans le cadre d'un Projet d'Aménagement et de Développement Durables (PADD) » (Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales, 2019)
Il est régi par le code de l'urbanisme aux articles L.141-1 et suivants. Il doit permettre, entre autres d'anticiper les conséquences du dérèglement climatique. C'est en cela qu'il concerne notre propos sur la ville éolienne.

Cependant, il n'est pas assorti d'un règlement opposable, il s'agit d'un document d'orientation générale (Voir Figure 4- 20) avec d'éventuelles recommandations concernant le climat urbain.

Domaines d'action	**Bâtiment**		**Espace public**		**Organisation spatiale**	
	Forme du bâtiment	Composition du bâtiment	Forme, géométrie et composition des rues	Nature des espaces végétalisés	Densités (densité de construction, densité d'espaces végétalisés, etc.)	Agencement des espaces et forme et profil de l'espace urbain
SCOT					[+] Etat initial qui peut être l'occasion d'effectuer une carte climatique du territoire. Document d'orientation générale avec de possibles recommandations relatives au climat urbain. [–] Document non opposable aux tiers.	
Opposable	[+] Possibilité d'intégrer au rapport de présentation et au PADD des éléments sur les enjeux du climat urbain pour la collectivité. [–] Documents non opposables aux tiers.					
PLU Opposable	[+] Art. 6, 7, 8 et 10 (opposable aux tiers) du règlement sur l'implantation des constructions et la hauteur maximum des constructions. [–] Taux de renouvellement du bâti <1% du bâti.	[+] Art. 11 (opposable aux tiers) sur l'aspect extérieur. Art. 14 : augmentation du COS si critères de performances énergétiques. [–] Aucune possibilité d'intégrer des critères thermiques (limite droit d'urbanisme/ droit de la construction)	[+] Art. 6, 7, 8 et 10 (opposable aux tiers) du règlement sur l'implantation des constructions et la hauteur maximum des constructions. Gestion par les services de la ville. [–] Taux de renouvellement du bâti <1% du bâti.	[+] Gestion par les services de la ville des espaces verts.	[+] Art. 9, 13 et 14 (opposable aux tiers) sur l'emprise au sol, les espaces libres et les plantations, et sur le COS.	[+] Zonage (zones urbanisés, à urbaniser, agricole, naturelles ou forestières). [–] Taux de renouvellement du bâti <1% du bâti.
ZAC	[+] Règlement plus contraignant que celui du PLU et permettant d'introduire des exigences sur les caractéristiques thermiques et radiatives du bâtiment. [–] Règlement sur un « morceau » de territoire.					
Légende		Echelle spatiale inappropriée.				

Figure 4- 23: Tableau atouts et limites des SCOT, PLU et ZAC pour la prise en compte de l'environnement climatique (© Morgane Colombert)

Le PLU :
« Le plan local d'urbanisme est un document d'urbanisme qui construit un projet d'aménagement à l'échelle d'une commune ou d'un groupement de communes (PLUi). Un décret, entré en vigueur le 1er janvier 2016, modernise le PLU. Son objectif, passer d'un urbanisme règlementaire à un urbanisme de projet » (Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités locales, 2019).
Il est régi par le code de l'urbanisme, Art.L.121-1. Il détermine, entre autres, les conditions d'un aménagement du territoire respectueux des principes de développement durable. C'est à ce titre qu'il nous concerne.
Il propose dans ses différents articles des dispositions, opposables aux tiers, régissant les règles de constructions pour l'obtention d'un permis de construire. Il permet donc de préciser les dispositions architecturales d'un projet, dont, par exemple la volumétrie, les hauteurs, l'aspect extérieur. Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, autant d'éléments influant sur le potentiel de ventilation naturelle d'un bâtiment. Les OAP (Orientation d'Aménagement et de Paysage) sont intégrées dans le PLU et deviennent ainsi opposables, comme dans notre étude de cas (voir ci-après).

La ZAC
« Une ZAC est une zone à l'intérieur de laquelle une collectivité publique, ou un établissement public y ayant vocation, décide d'intervenir pour réaliser ou faire réaliser un aménagement et l'équipement de terrains, notamment ceux acquis ou à acquérir en vue de les céder ou les concéder ultérieurement à des utilisateurs publics ou privés. » (DGFIP, 2017)
Elle est régie par le code de l'urbanisme, Art.L.311-1 et suivant. Elle précise, entre autres, dans son dossier, l'objet et la justification de l'opération, le programme prévisionnel des constructions à édifier au regard des dispositions d'urbanisme en vigueur (dont le PLU).
Elle est donc assujettie à la conformité au PLU. Elle permet une définition plus précise de certaines caractéristiques des bâtiments, dans un référentiel DD (Développement Durable) par exemple. Par contre le Conseil d'Etat précise dans un arrêté : « c'est un document de pure planification opérationnelle définissant le périmètre et le programme de l'opération à réaliser dans le cadre de cette zone, mais qui en revanche, n'a pour objet ni d'édicter des règles d'urbanisme, ni de permettre la réalisation de travaux. » (Conseil d'Etat, 2011).
Au regard de ces éléments, il apparait donc essentiel, d'intégrer dans le règlement du PLU les éléments définissant notre projet de la ville éolienne. C'est bien ce que nous avons fait dans l'étude de cas décrite ci-après.

Le domaine d'action, les avantages et inconvénients de ces différents documents est décrit de manière précise par Morgane Colombert (Colombert, 2010) et est résumé dans la Figure 4-20.

4 Conclusions des exemples étudiés

On peut donc noter que, dans aucun de ces exemples analysés, à l'exception de Sidi Sayeh, le lien entre la forme urbaine, facilitant la ventilation naturelle des espaces et les bâtiments intégrés dans cette trame, profitant de ce potentiel, ne semble clairement établi. En tout cas, s'il l'est, il n'est pas quantifié.

C'est pourtant bien une de nos préoccupations en milieu tropical : voir comment une forme urbaine déterminée peut favoriser le potentiel des bâtiments la constituant, sans nuire au potentiel de ses voisins. C'est à cette tâche et recherche que nous nous sommes attelés dans le projet Cœur de ville Possession et pour lequel nous avons développé le concept de droit à la ventilation naturelle et d'urbanisme éolien. Ce concept reprend d'autres existants comme le droit à la vue, le droit au soleil (droit non écrit développé par exemple dans la Médina de Fès).

Au vu des exemples précédents, on comprend que cette notion soit fondamentale si l'on veut développer des villes tropicales durables dans le futur et faire face aux défis climatiques qui s'annoncent.

A l'exception notable du règlement d'urbanisme de la ville de Cairns et du projet spécifique de Sidi Sayeh, nous n'avons pas trouvé d'exemple de transposition de ces préoccupations de ventilation naturelle des bâtiments constituant une ville ancienne ou nouvelle. C'est bien ce vide dans l'urbanisme réglementaire français que nous avons essayé de combler dans notre travail sur le projet Cœur de Ville de La Possession et que nous allons développer ci-après.

L'objectif de ce travail n'est pas de développer des outils conceptuels nouveaux, mais plutôt d'appliquer un savoir technique, l'aéraulique, à un exemple concret et de le rendre opérationnel à l'échelle de la ville, à l'image du travail de Cipriano, (Cipriano et al., 2017),qui propose des indicateurs à l'usage des décideurs et urbanistes pour améliorer l'efficacité énergétique des villes.

A travers cette étude de cas projet, nous allons voir comment proposer une méthodologie d'application et sa transcription dans un document d'urbanisme, le PLU, afin de rendre ce concept de ville éolienne opposable, donc applicable et reproductible ?

5 Méthodologie

Nous allons dans cette section illustrer au travers d’une étude de cas, comment notre démarche a évolué pour intégrer toutes les échelles de conception afin d’optimiser le fonctionnement en ventilation naturelle des bâtiments. Pour ce faire, nous avons dû faire évoluer le jeu des acteurs concernés (en particulier en phase de conception). Nous avons surtout au final, afin de préserver ce potentiel et pour ainsi dire transformer l’essai, réfléchi à l’intégration de ces concepts dans une démarche réglementaire, en trouvant les documents appropriés garantissant ce droit à la ventilation naturelle, condition sine qua non de l’optimisation du confort en ventilation naturelle nécessaire en climat tropical. Nous allons donc expliciter notre méthode, avec ses jeux d’acteurs, les documents produits, comment ils ont été rendus opposables et avec quels résultats ?

5.1 Données programmatiques

Nous sommes partis du cahier des charges de la ville :

"L'opération "Cœur de Ville" est une opération d'aménagement d'envergure pour la Commune de la Possession qui constitue une véritable opportunité d'aménagement immédiate du centre-ville existant.
Cette opération a pour objectifs:
- de créer un centre-ville commerçant et une offre de services répondant aux attentes légitimes de la population
- de dynamiser le centre-ville tout en conservant l'idée de "ville-jardin".
- de densifier le centre-ville dans le cadre d'une offre diversifiée de logements.

L'opération Cœur de ville se situe à proximité immédiate du centre de la Possession et de ses rues commerçantes (Sarda Garriga et Leconte Delisle). Les terrains d'assiette de la ZAC, peu urbanisés malgré leurs positions privilégiées, sont principalement constitués de parcelles d'habitat individuel et de surfaces agricoles dans la partie Sud. La ZAC centre-ville prévoyait la création d'un nouveau quartier de ville à la Possession. Cet aménagement avait comme objectif principal de conférer à la commune une véritable centralité commerçante, en prolongement des équipements existants, qui soit en adéquation avec une ville de 30 000 habitants.
Opération d'aménagement complexe, cette ZAC intégrait l'insertion du Tram Train comme élément fondamental de structuration du projet d'aménagement.
Les nouvelles données contextuelles ci-dessous sont aujourd'hui à l'origine de la reprise active du projet d'aménagement par la Commune de la Possession.
- la volonté politique de démarrer opérationnellement le projet dans la mandature du maire
- la décision d'abandonner le projet Tram Train par la Région au mois de Mai 2010
- la remise en cause par la commune de la passation d'un contrat de concession avec la SPLA
- l'abandon du mécanisme de défiscalisation sur les programmes de logements locatifs libres
- les projets de certains promoteurs et propriétaires des terrains d'assiette de contractualiser des Projets Urbains partenariaux avec la Commune
- **L'inscription du projet dans la démarche développement durable "Eco cité" de la communauté d'agglomération du TCO**
- la volonté d'élargir le périmètre de réflexion du projet urbain en partie sud sur les terrains agricoles, classés en zone agricole au projet de SAR validé en novembre 2010 situés entre le chemin Boeuf Mort et la ravine à Marquet."

Au-delà de ces problématiques, les questions et les problématiques soulevées sont également aujourd'hui:
Comment créer un centre-ville pour la Commune à l'opposé du petit centre historique (l'église)?
Comment réussir l'urbanisation du quart du centre-ville sans tourner le dos à l'existant, mais au contraire, en se greffant sur lui?
Comment ouvrir l'ensemble de la Commune vers son littoral, ses ravines, ses parcs?
Comment anticiper les différentes possibilités de réalisation d'un Transport en Commun en Site Propre dans un urbanisme évolutif?
Comment créer la ville dense en préservant et en développant la notion de Ville jardin?

Nous avons toutefois eu l'ambition d'aller au-delà de ces demandes et de proposer un projet emblématique de la ville tropicale environnementale développant, entre autres, un concept novateur du **droit à la ventilation naturelle** pour les constructions projetées dans ce quartier nouveau.

5.2 Données climatiques :

La source de données climatiques pour la température, l'hygrométrie, l'ensoleillement sont issues des données météo France pour la station la plus proche de la ville du Port.
Pour la donnée vent, conscient, par notre expérience des spécificités de l'île en cette matière, nous avons collaboré avec notre ingénieur conseil en aéraulique pour une étude aéroclimatique, fournissant un recalage de la donnée vent en prenant en compte le contexte topographique et la rugosité urbaine influençant fortement cette donnée.

5.3 Données géographiques

La littérature et les chapitres précédents nous ont montré l'influence du contexte géographique, en particulier de la topographique et la rugosité environnante sur la modification du potentiel de ventilation d'un site.

5.4 Données règlementaires

Un projet d'urbanisme s'inscrit dans une démarche réglementaire. Une partie de notre travail a été de préciser la bonne échelle réglementaire a même d'assurer la pérennité des concepts et règles mis en place. Nous avons pour cela analysé le contexte règlementaire issu du Code de l'urbanisme avec ses différentes échelles le SCoT, Le PLU, la ZAC. L'analyse bibliographique du travail de Morgane Colombert (Colombert, 2008) nous a montré que le PLU était l'échelle appropriée.

5.5 Données d'organisation de l'équipe

Nous avons appliqué ici la méthode de co-conception ingénieur aéraulique/urbaniste.

La présente étude de cas découle spécifiquement d'une collaboration étroite en amont entre l'ingénieur conseil aéraulique, Jacques GANDEMER, et l'équipe de conception de LEU Réunion, notre bureau d'étude. Elle s'est inspirée du concept de l'integrated design process (voir Figure 4- 25) de synergie (ou holisme) proposant une démarche transversale et non verticale dans laquelle *« le tout est plus que la somme des parties qui la compose » (Jan Christiaan Smuts)* (Smuts Hon J.C., 1927) et que nous avons déjà utilisé avec succès (voir chapitre 3 collège de Bouéni). Elle s'articule autour de deux missions principales successives : urbaniste mandataire et maitrise d'œuvre urbaine réalisées par LEU Réunion en tant que mandataire de l'équipe(voir Figure 4- 24)

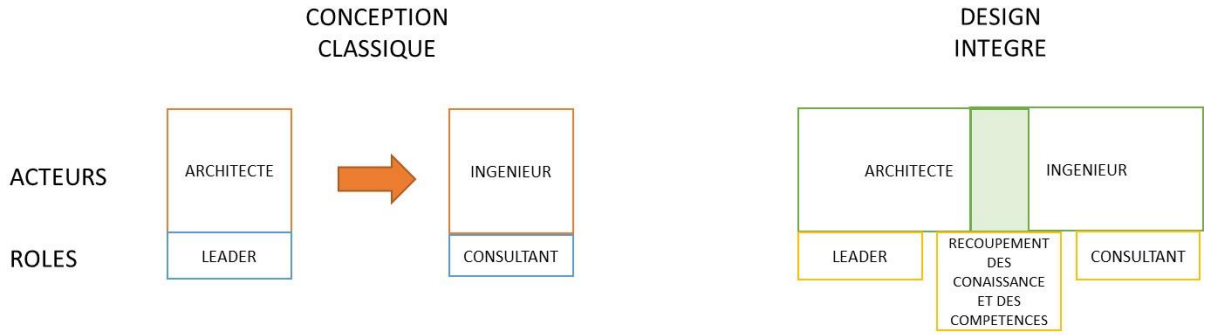


Figure 4- 25: Schéma explicatif du design intégré

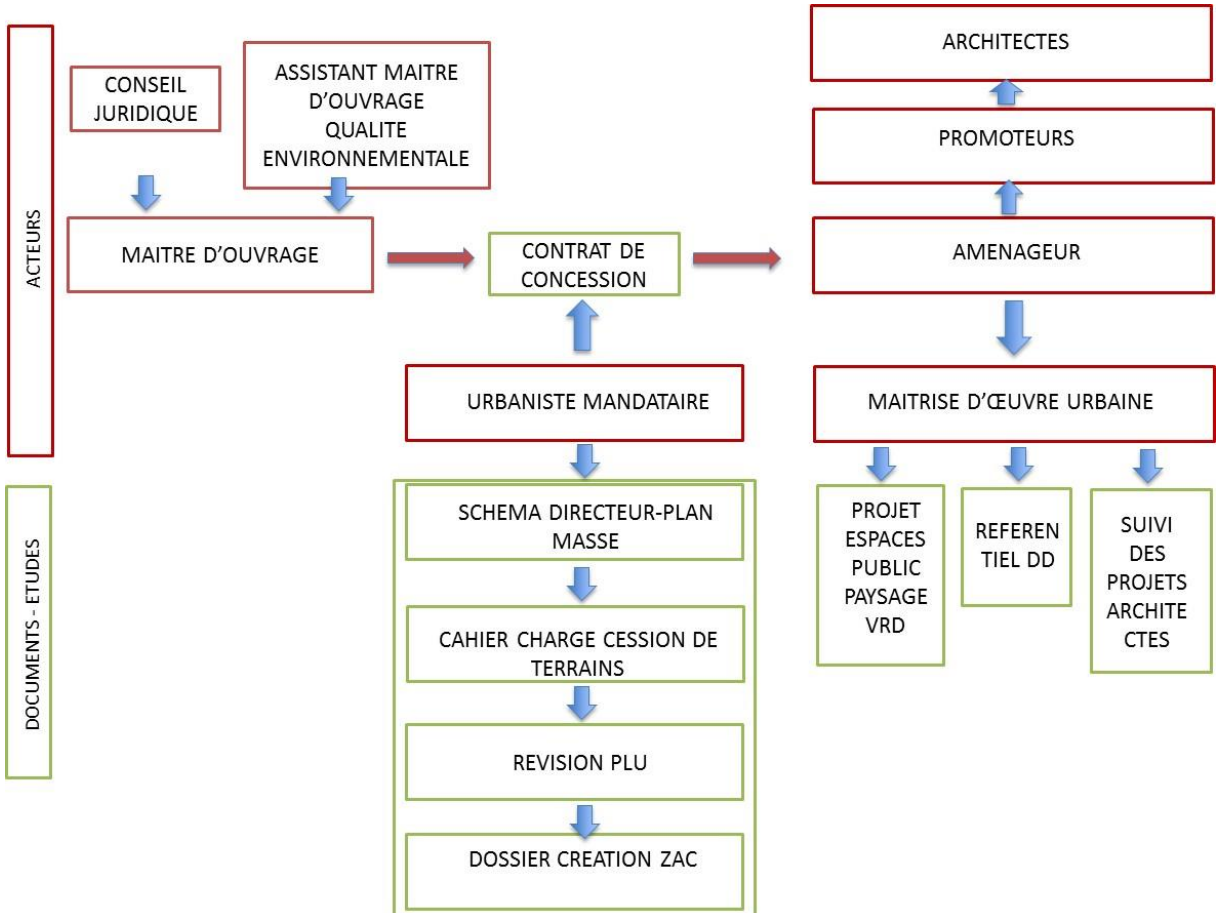


Figure 4- 24: Schéma fonctionnel de la ZAC Cœur de Ville Possession

Ces deux missions s'organisent autour d'une équipe complète pour chaque phase, en fonction des besoins , urbanisme (voir Figure 4- 27) et maitrise d'œuvre urbaine (voir Figure 4- 26). On constate la nécessité d'une équipe nombreuse à l'image de la complexité de ce genre de projet et recouvrant des champs disciplinaires variés et complémentaires. L'urbaniste mandataire y coordonne une organisation horizontale propice là-encore à la coconception.

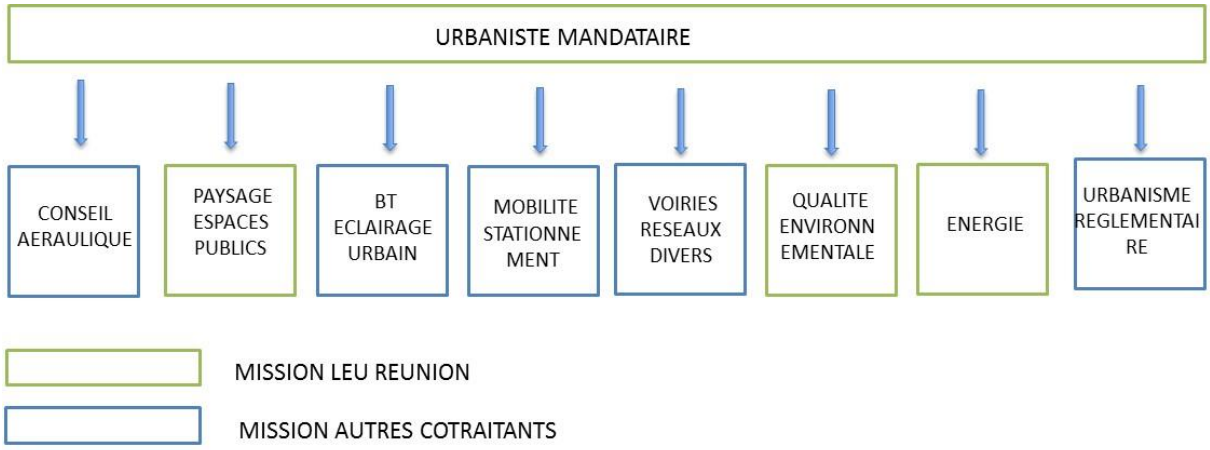


Figure 4- 27 : Organisation de l'équipe d'urbanisme

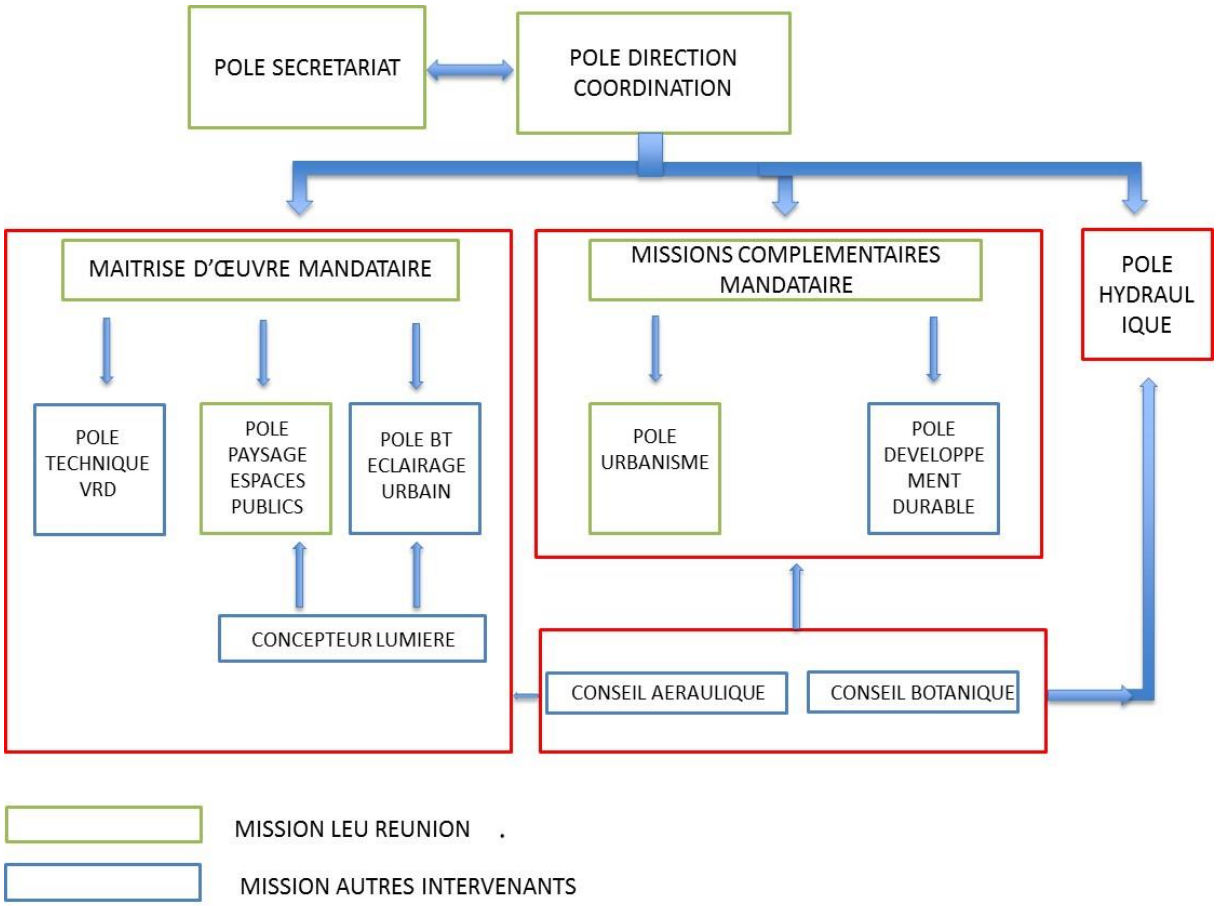


Figure 4- 26: Schéma d'organisation de l'équipe de maitrise d'œuvre urbaine montrant la répartition en trois pôles : maitrise d'œuvre, missions complémentaires et hydraulique

A la genèse de cette étude un atelier de travail a été mis en place durant lequel nous avons échangé sur nos objectifs et préoccupations propres afin de faire émerger d'éventuelles solutions intégrant les contraintes du projet. Il ne s'agit donc pas ici d'une démarche dans laquelle le concepteur urbaniste définit des formes urbaines et les fait optimiser ou étudier dans un second temps par l'ingénieur.

5.6 Données de stratégie d'aéraulique urbaine

Afin de prendre en compte le phénomène vent dans l'organisation urbaine, nous avons commandé une étude en soufflerie afin de déterminer la ou les formes urbaines et leur organisation la plus propice à la préservation du potentiel de ventilation naturelle dans la trame urbaine et dans les bâtiments insérés dans cette trame, objectif final à atteindre. Cette étude s'est faite sur la base d'échanges préalables en co-conception urbaniste/ ingénieur aéraulique (comme rappelé précédemment).

6 Contexte

6.1 Contexte programmatique

Le projet s'inscrit dans une commande de la ville de la Possession, île de La Réunion, elle a pour cela édité un cahier des charges résumé ci-dessous :
"L'opération "Cœur de Ville" est une opération d'aménagement d'envergure pour la Commune de la Possession qui constitue une véritable opportunité d'aménagement immédiate du centre-ville existant.
Cette opération a pour objectifs:

- de créer un centre-ville commerçant et une offre de services répondant aux attentes légitimes de la population ;
- de dynamiser le centre-ville tout en conservant l'idée de "ville-jardin" ;
- de densifier le centre-ville dans le cadre d'une offre diversifiée de logements.

L'opération Cœur de ville se situe à proximité immédiate du centre de la Possession et de ses rues commerçantes (Sarda Garriga et Leconte Delisle). Les terrains d'assiette de la ZAC, peu urbanisés malgré leurs positions privilégiées, sont principalement constitués de parcelles d'habitat individuel et de surfaces agricoles dans la partie Sud. La ZAC centre-ville prévoyait la création d'un nouveau quartier de ville à la Possession. Cet aménagement avait comme objectif principal de conférer à la commune une véritable centralité commerçante, en prolongement des équipements existants, qui soit en adéquation avec une ville de 30 000 habitants.
Opération d'aménagement complexe, cette ZAC intégrait l'insertion du Tram Train comme élément fondamental de structuration du projet d'aménagement.
Les nouvelles données contextuelles ci-dessous sont aujourd'hui à l'origine de la reprise active du projet d'aménagement par la Commune de la Possession.

- la volonté politique de démarrer opérationnellement le projet dans la mandature du maire ;

- la décision d'abandonner le projet Tram Train (projet de transport inter régional guidé) par la Région au mois de Mai 2010 ;
- la remise en cause par la commune de la passation d'un contrat de concession avec la SPLA ;
- l'abandon du mécanisme de défiscalisation sur les programmes de logements locatifs libres ;
- les projets de certains promoteurs et propriétaires des terrains d'assiette de contractualiser des Projets Urbains partenariaux avec la Commune ;
- L'inscription du projet dans la démarche développement durable "Eco cité" de la communauté d'agglomération du TCO (Territoire de la Côte Ouest) ;
- la volonté d'élargir le périmètre de réflexion du projet urbain en partie sud sur les terrains agricoles, classés en zone agricole au projet de SAR validé en novembre 2010 situés entre le chemin Boeuf Mort (voir trait bleu Figure 4- 28 et la ravine à Marquet voir Figure 4- 28)."

Au-delà de ces points, les questions et les problématiques soulevées sont également aujourd'hui:

- Comment créer un centre-ville pour la Commune à l'opposé du petit centre historique (l'église)?;
- Comment réussir l'urbanisation du quart du centre-ville sans tourner le dos à l'existant, mais au contraire, en se greffant sur lui?
- Comment ouvrir l'ensemble de la Commune vers son littoral, ses ravines, ses parcs?
- Comment anticiper les différentes possibilités de réalisation d'un Transport en Commun en Site Propre dans un urbanisme évolutif?;
- Comment créer la ville dense en préservant et en développant la notion de Ville jardin?

Avec ces préoccupations urbaines « classiques », on peut noter la volonté affirmée de s'insérer dans la démarché « éco–cité »définie dans le document :(Direction générale de L'Aménagement, du Logement et de la Nature, 2016), sous tendant une démarche environnementale forte et de préserver l'aspect de ville jardin chère à la commune.
C'est en s'appuyant sur ces deux critères que nous avons entamé notre travail sur la tentative de définition d'une ville tropicale environnementale.
Le contexte programmatique est aussi défini par le projet de la ville de La Possession et est transcrit dans le programme, tant en terme d'équipement à prévoir, que de typologie bâtie. Il doit à échéance définir un nouveau centre de vie pour la commune.
Il comprenant initialement :

- Environ 1670 logements dont 350 logements sociaux ;
- Une grande esplanade arborée, une grande surface alimentaire et des commerces diversifiés ;
- Une station majeure du Tram train (abandonnée par la suite) ;
- De nouveaux équipements (médiathèque, groupe scolaire, crèche) ;
- Une zone d'activité de bureaux (environ 3000m²).

6.2 Contexte géographique et climatique

6.2.1 Contexte géographique

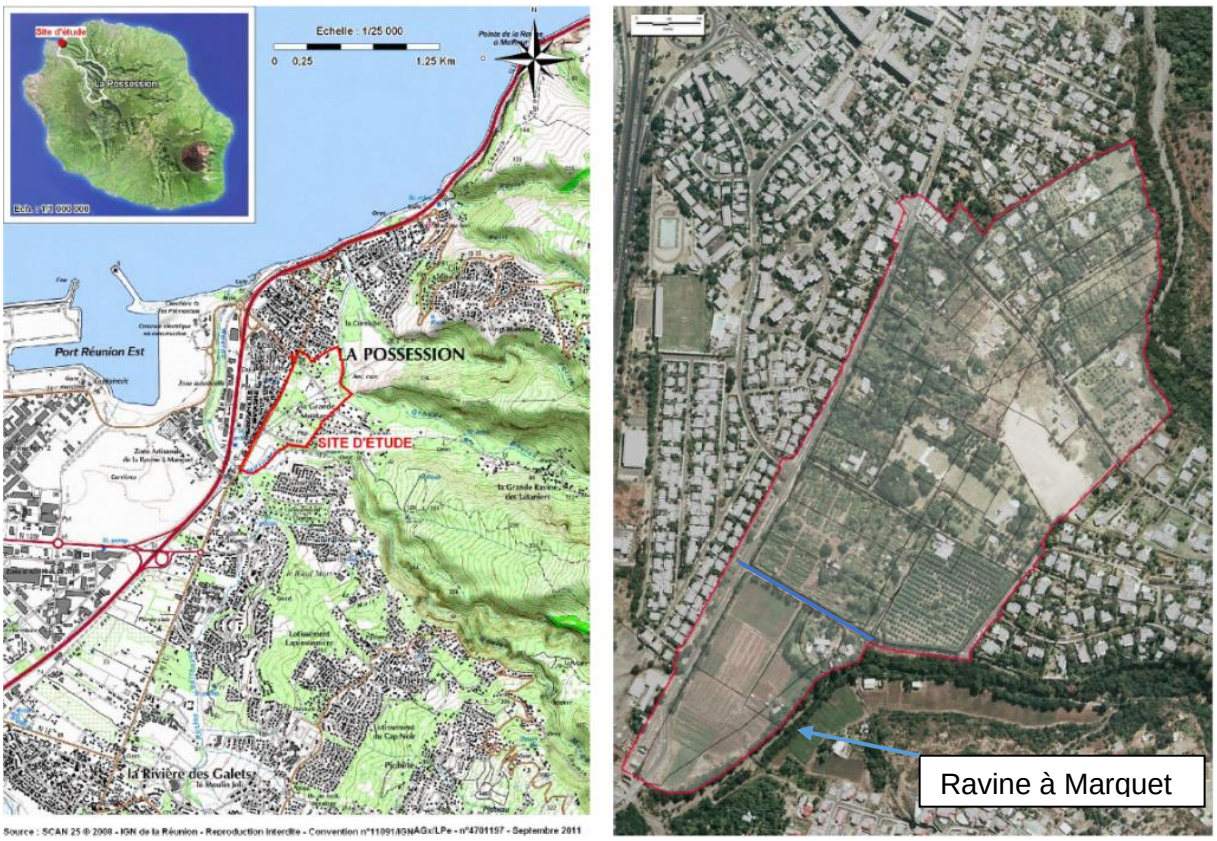


Figure 4- 28: Localisation du site d'étude – extrait carte (© IGN) à gauche – (© Google Earth) à droite

La Figure 4- 28 montre l'environnement montagneux du site, avec la falaise de la route du littoral au Nord, la montagne à l'Est, l'océan au Nord-Ouest. Il est aussi marqué par deux ravines, dont la principale, la Ravine à Marquet.

6.2.2 Contexte climatique (voir Figure 4- 29 et Figure 4- 30) :

Les données climatiques ci-après montrent que, dans notre cas, la situation n'est pas si favorable et le challenge bien réel. Il n'est pas inutile de rappeler que, compte tenu de son relief montagneux au centre, avec un point culminant à 3000m, la Réunion est marquée par de grandes disparités météorologiques, traduites par de nombreux microclimats et en particulier en termes de direction et intensité du vent.

Température : moyennes comprises entre 19 et 26 °C. Avec une température maximale extrêmes en saison chaude de 36,9°C et minimale extrême en saison froide de 14,9°C, une moyenne mensuelle maximale 31,8°C en en Février et une moyenne minimale mensuelle de 18,9°C en Juillet.
Pluviométrie : Faible, moyenne annuelle comprise inférieure à 1.5m, saison des pluies de janvier à mars
Insolation : élevée, durée moyenne annuelle 2500 h/an, un rayonnement global en moyen en Janvier de 2900J/m² et de 1400J/m² en Juillet.
Vent : faibles, régime de brises dominant. Site d'étude protégé des vents par rapport à la ville du Port (rose des vents présentée), l'exposition aux alizés de Nord-Est est moins marquée.

Au niveau méthodologique, on voit ici le premier écueil rencontré dans tout projet bioclimatique, qu'il soit urbain ou architectural: la fiabilité de la source. Il n'y a

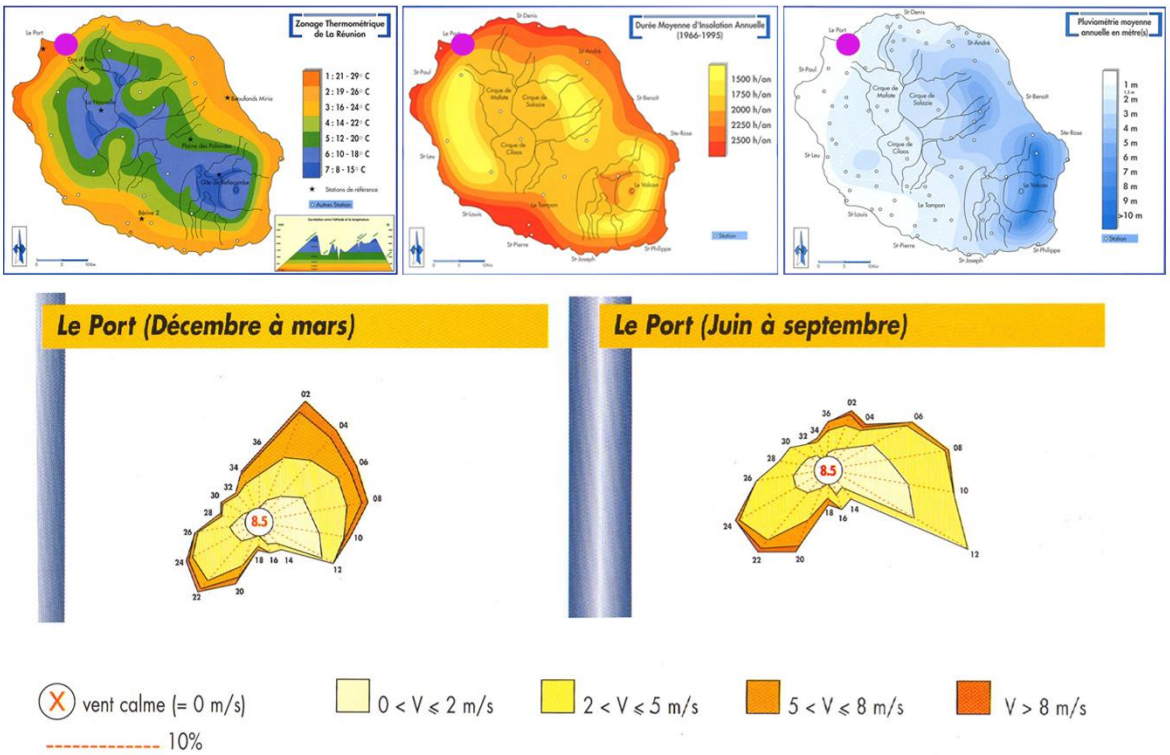


Figure 4- 29: Extrait carte météo et rose des vents, (© Météo France) « Atlas climatique de la Réunion »

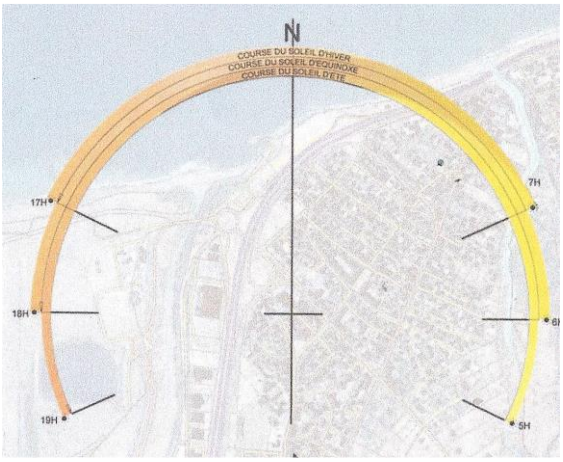


Figure 4- 30: Course du soleil sur le site – (© LEU Réunion)

malheureusement pas de station météo au pied de chaque projet. Or par notre connaissance du site et son contexte on peut affirmer, que les données les plus proches de la station de la ville du Port, distante de quelques kilomètres (voir Figure 4- 31) nécessitent, pour le moins, d'être considérées avec prudence. En effet, la ville de la possession est positionnée au pied d'une falaise importante située au Nord Est. Or, en analysant les données météo, on peut noter qu'en période chaude, celle qui nous intéresse le plus eu égard au confort d'été, les vents dominants viennent du Nord Est. Ils seront surement perturbés par ce relief (la falaise

de la route du littoral), diminuant ainsi de manière non négligeable, le potentiel de ventilation du site.

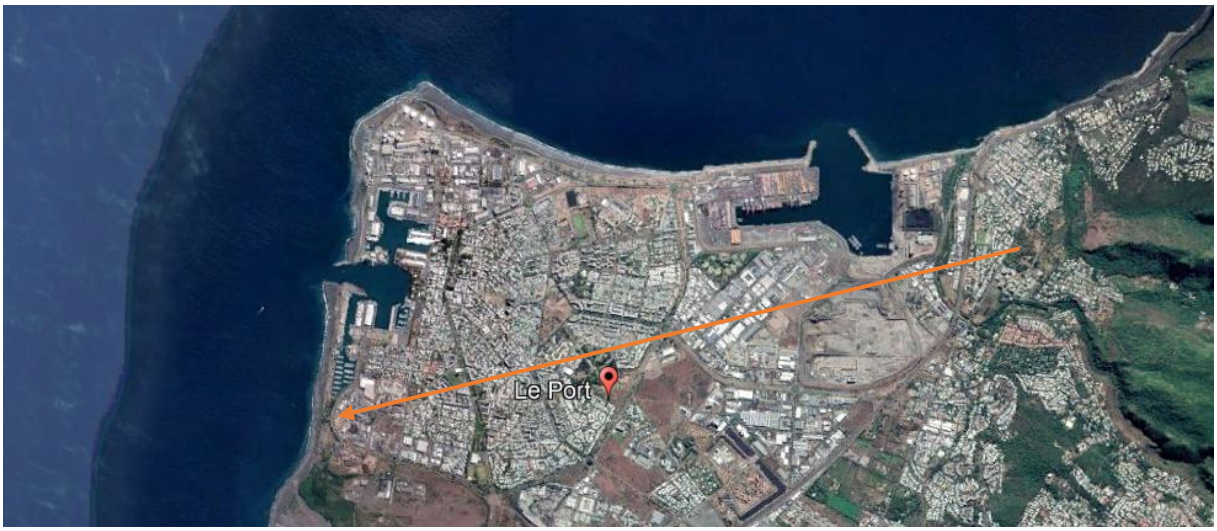


Figure 4- 31: Position du projet par rapport à la station météo du Port (© Google Earth)

6.2.3 Contexte aéroclimatique :

Afin de palier à cette incertitude, nous avons procédé à un recalage climatique, sur la base des données météo et de l'analyse de J Gandemer. De même qu'il apparait normal voire obligatoire de faire une étude de sol avant de faire un bâtiment, **un projet aéro-climatique, voire environnemental ne peut pas s'envisager sans données météo fiables**. Avec le maillage de station Météo France ce point ne pose généralement pas de problème pour les données températures, humidité, rayonnement solaire. Par contre, le cas particulier de la Réunion, avec son relief très marqué, nous a fait prendre conscience de la grande variabilité, à quelques kilomètres près, de la donnée vent. Forts de ce constat récurrent sur nos projets, nous avons appliqué une méthode de recalage de cette donnée.
Pour rappel, une donnée vent, pour être exploitable et représentative, doit être établie sur une période de 10 ans. Nous n'avons malheureusement pas 10 ans de mesures à effectuer avant de lancer une étude.
De manière idéale, dans un premier temps nous avons envisagé la mise en place d'une station météo sur le site avec prise de mesures de la vitesse et la direction du vent. Ces mesures sur 6 mois devant permettre un recalage climatique par une méthode, par pas de temps comparable, avec une station de référence, fiable, proche. Il faut prendre en compte le fait que toutes les stations météo ne permettent pas l'acquisition fiable de la donnée vent (position, nature de l'anémomètre….).
Pour des raisons d'accord du maitre d'ouvrage, cette station n'a pu être mise en place à l'époque. Nous avons donc travaillé avec une approche moins précise basée sur une transposition des données de la station du Port par la prise en compte du relief et de la rugosité du site d'un point de vue uniquement qualitatif (Gandemer, 2011) pour évaluer la direction des vents dominants:
« L'irrigation du site repose sur:

- *Les vents de contournement montagneux (cirque de Mafate) Sud-Ouest et Nord-est.*
- *Les Alizés de l'Est / Sud-est ;*

- *L'existence de brises thermiques venues perpendiculairement à la mer et grossièrement de l'Ouest / Nord-ouest pour les flux frais marins (matin) et de l'Est / Sud-est pour les flux frais terrestres descendus des hauteurs (soir et nuit) ;*

Ces brises thermiques ont des niveaux de vitesse relativement réduites (moyenne de 2 à 4 m/s environ) mais sont constantes et doivent être utilisées au maximum de leur possibilités compte tenu de leur intérêts en ventilation de confort (brise de mer en rafraichissement des masses bâties et jeu de leur inerties).

L'environnement est relativement urbanisé côté mer et induit un effet de masque global sur le site pour les flux marins et réduit la vitesse du vent et sa pénétration dans les basses couches. Il faut donc trouver un urbanisme qui s'affranchisse de cette contrainte. (Voir Figure 4- 32*)*

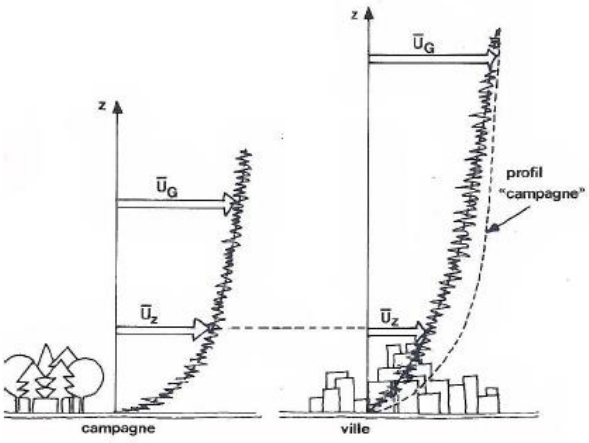


Figure 4- 32: Croquis comparatif profil du vent campagne/ville– (© J Gandemer)

La topographie du site donne un dénivelé d'environ 25m entre la RN1 et le plateau « Grande montagne » avec un axe plutôt Nord-ouest : Sud – est. L'urbanisation proposée doit profiter de cet « effet d'élévation ». Au demeurant les pentes des montées sur le plateau sont trop douces et seront « rugosifiées » par l'urbanisation pour qu'il existe une accélération au « sommet » du plateau. Par contre l'effet favorable de la hauteur joue positivement sur la dynamique des vents (voir ***Erreur ! Source du renvoi introuvable.****)). En couplage avec la topographie l'existence d 'une grande ravine au Nord (ravine des Lataniers) et d'une petite au Sud a pour conséquence de développer la concentration et le guidage des courants frais (masse volumique plus lourde que l'air) descendus des hauteurs. L'urbanisation climatique doit chercher à utiliser ces veines fraiches.*

Par contre en brise thermique maritime, compte tenu de la montée globale de la topographie (montée vers le plateau), aucune concentration notable ne peut être considérée et le flux marin balaye le site globalement et de manière relativement homogène. » (Voir Figure 4- 33*)*

Afin de palier à cette approximation, une girouette a finalement été posée sur site en Mai 2019 et les données sont en cours d'exploitation et seront utilisés pour la tranche 2 en cours.

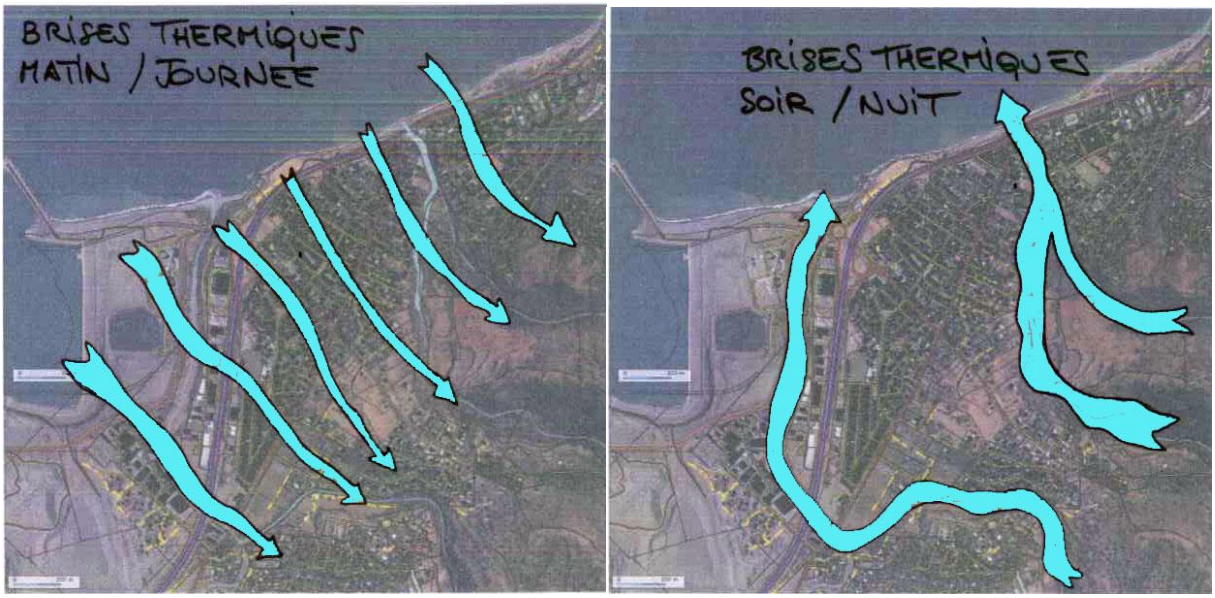


Figure 4- 33: Représentation des brises thermiques diurnes et nocturnes sur La Possession (© LEU / Gandemer)

6.2.4 Contexte bâti

Le projet est positionné dans un environnement urbain mixte, constitué de villas et de petits immeubles (R+3, R+4) relativement homogène, constituant une rugosité de type urbaine moyennement dense, ou de banlieue basse (voir Figure 4- 34 et Figure 4- 35). Il faut en particulier considérer ce contexte au vent du projet, c'est-à-dire Ouest, Nord/Ouest.

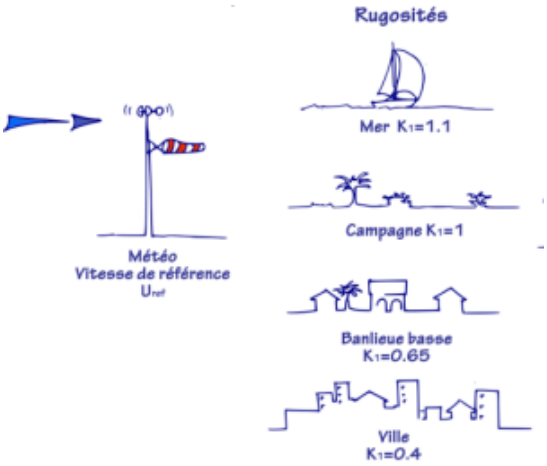


Figure 4- 35: Illustration de différentes rugosités © J Gandemer

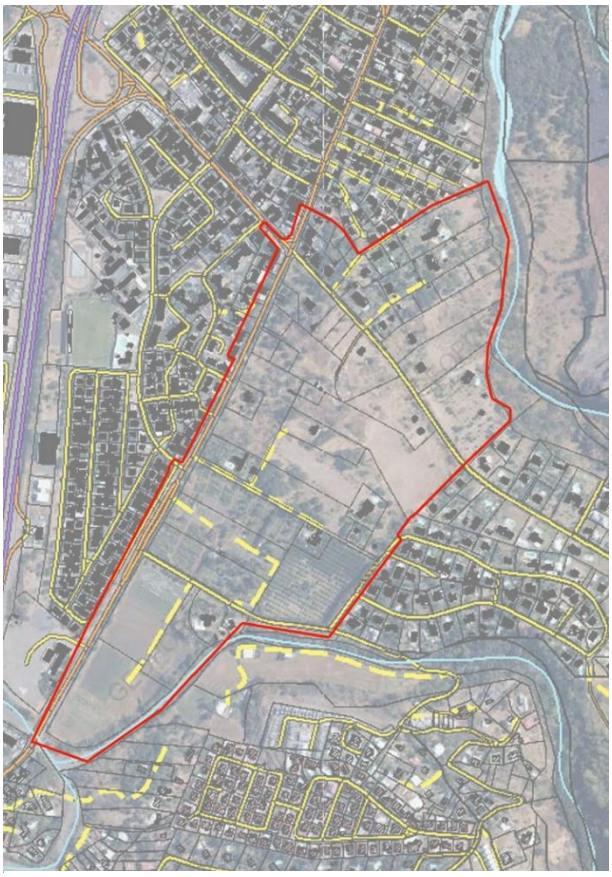


Figure 4- 34: Vue en plan, contexte du bâti environnant la zone d'étude – (© LEU Réunion)

6.3 Contexte réglementaire : le PLU

En plus des résultats de notre réflexion décrite ci-dessus, il s'avère nécessaire de transcrire ceux-ci dans un corpus de règles, guide ou autre susceptible d'être suivi par les concepteurs architectes des différents ilots pour garder la cohérence d'ensemble. En effet, il n'a été que trop souvent constaté que la simple description des ambitions ne permettait pas de garantir un résultat à la hauteur de celles-ci. Ce point a d'ailleurs été dénoncé récemment par Nicolas Michelin, architecte-urbaniste de nombreuses ZAC (Michelin, 2016) :
« L'architecte-urbaniste est lui très fragilisé dans le suivi d'une opération classique. Il est là pour établir un plan d'ensemble a minima, souvent sans détails de volumétrie sur les îlots (pour ne pas « contraindre » les futurs preneurs) et des recommandations architecturales générales (finalement peu respectées car jugées trop chères). Son rôle est par la suite de veiller au respect des règles et de donner son avis sur le dépôt de chaque permis de construire, ceci avec des petites missions et des honoraires réduits. Autrement dit, il n'a pas vraiment les moyens de créer une harmonie d'ensemble entre les projets des promoteurs, et de travailler dans la durée sur la qualité du quartier.
Les groupes immobiliers savent parfaitement se glisser dans cette méthode peu exigeante sur le fond. Ils s'accommodent facilement des cahiers des charges qu'ils contournent ensuite pour placer leurs produits immobiliers standards. En réalité, ils sont eux aussi pris dans ce système. Verrouillés par les impératifs financiers et les rendements que leur demandent les banques et les actionnaires, ils sont contraints de densifier et simplifier afin d'équilibrer leur bilan et sortir l'opération. » (Michelin, 2016).
Après consultations des juristes de l'équipe, point confirmé dans la thèse de Morgane Colombert (Colombert, 2008) , il est ressorti qu' une transcription de certaines règles dans les OAP (Orientation d'Aménagement et de Paysage), issues de l'étude urba-aéraulique, dans le PLU offrirait des garanties minimales, nécessaires pour assurer le succès du projet. En effet le PLU reste le document de référence opposable aux tiers et donc moins aisément « contournable » dans un projet d'urbanisme.
C'est cette démarche et ce travail que nous allons exposer ci-après et qui permet de sortir de l'exemple cœur de ville et d'envisager une méthode de transcription réglementaire d'un urbanisme éolien.

6.4 Contexte de stratégie aéro-climatique

Les conditions à mettre en place pour réussir cette urbanisation climatique, cette ville jardin tropicale, objet de la commande initiale, ont été élaborées et définies en collaboration avec Jacques Gandemer ingénieur conseil et sont :

- La prise en compte de l'environnement existant du site (bâti, végétal, minéral, etc…)
- L'intégration des effets topographiques (dénivelé, ravines, couloirs, etc …)
- L'utilisation totale des toutes les données et ressources climatiques à des fins de contrôler et de gérer naturellement les ambiances climatiques.
- Une réflexion à toutes les échelles (de la macro au local) du bâti et des espaces intermédiaires (tous aussi déterminant climatiquement).

Les principes aéro-climatiques proposés vont de l'échelle de l'urbanisation globale avec le jeu et le contrôle des interactions des masses bâties et des espaces intermédiaires (tampons

végétaux intégrés), jusqu'à la conception aérodynamique fine et cohérente de plot « auto-ventilé ». L'optimisation de ces modules ou plots sera faite sur modélisation en maquette physique (étude en soufflerie) et permettra d'optimiser deux à trois plots de référence (Gandemer, 2011)

Comme de nombreux processus de conception, il s'agit là d'un travail itératif et non linéaire. En dernier lieu, la transcription a pu se concrétiser par l'utilisation d'outils réglementaires, les OAP et une définition du projet, dans le cadre d'une révision du PLU, afin de rendre ces dispositions opposables aux tiers et opérationnelles.

Les conclusions opérationnelles de l'étude commandée peuvent être résumées :

6.4.1 Conclusion opérationnelle de l'étude en soufflerie (Gandemer, 2011) :

« L'architecture en plot patio ou en U ouvert dans les proportions et transparence étudiée fonctionne sous l'angle d'une ventilation naturelle efficace des appartements.

- *En plots patio « isolé » (distance entre deux plots supérieure à 60m) et si l'on veut réussir la ventilation naturelle pour 100% des logements, il faudra privilégier l'implantation des deux façades à pilotis vers la direction des vents dominants (ou du vent que l'on veut essentiellement utiliser en ventilation naturelle) à plus ou moins 30° autour de(Gandemer, 2011) la direction du vent moyen ;*
- *Pour le plot en U ouvert « isolé », si l'on veut réussir 100% de la ventilation naturelle des appartements il faudra orienter l'ouverture du U vers la direction des vents dominants (à + ou – 45° autour de la direction moyenne) (voir* Figure 4- 36*) ;*

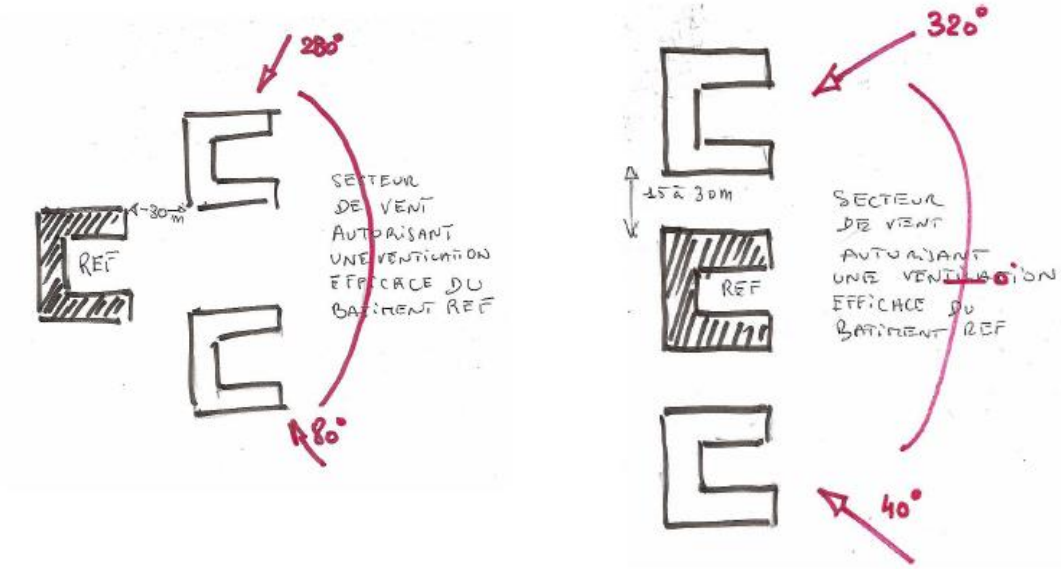


Figure 4- 36: Illustration des principes d'inter-distance pour une organisation en quinconce (à gauche) et alignés (à droite) © J Gandemer

- *Dans une urbanisation à plots et pour ne pas compromettre les mécanismes de ventilation traversante, nous conseillons des espaces minimums de 30m, et les mêmes recommandations d'orientation vis-à-vis des vents dominants que précédemment ;*

- *D'une façon générale il faudra privilégier les semis en quinconce (et non en ligne) des plots d'une part, et adopter toujours des orientations en légère obliquité du plan masse par rapport aux vents dominants (les incidences précises aux façades sont difficiles à « ajuster » compte tenu de la variabilité du vent et de sa connaissance sur le site) ;*

- *L'architecture développée veut proposer une urbanisation relativement compacte de ventilation naturelle efficace pour tous les appartements. Or pour certaines configurations et directions de vent, il a été montré que 70% et même 50% seulement des appartements d'un plot fonctionnaient totalement en ventilation naturelle. Cependant les résultats et la nature instationnaire des mécanismes (siphonage, etc.) et quelles que soient les configurations retenues et recommandées (porosité et espacements notamment) nous assurent que tous les appartements auront des taux de renouvellement d'air d'au moins 10 vol/heure respectées.*

Par la suite et en considérant les contraintes pratiques et climatiques du site et d'une urbanisation de la ZAC de La Possession, il existera des appartements qui n'auront pas une ventilation naturelle efficace et ce même si les conditions aérodynamiques préconisées ont été respectées. Aussi et en gardant en mémoire que les charges thermiques sont bien évacuées dans tous les appartements on équipera alors les unités « défectueuses »de brasseur d'air. Ce dernier point suppose lors de réalisation de prévoir des attentes électriques. Il reste maintenant de dessiner la ZAC, en utilisant largement ces prototypes aérodynamiques de plots à patios ou à U ouvert. »

7 Résultats et discussion. Superposition de la stratégie aéro-climatique et de la réflexion urbaine :

La stratégie précédente définie ne constitue pas le projet urbain. Elle s'intègre à une démarche globale intégrant l'ensemble des éléments constitutifs d'un projet de ZAC : A cette stratégie se superpose la stratégie urbaine que nous abordons ci-après. L'originalité de la démarche et notre apport consiste en l'assistance en amont d'un conseil en aéraulique et de l'intégration dans le PLU des OAP reprenant les prescriptions relatives au fonctionnement aéraulique de l'ensemble.
L'étude urbaine s'est donc faite en cinq étapes :

- Première étape : Définition des scénarios urbains initiaux ;
- Deuxième étape : Définition d'une stratégie aéroclimatique à l'échelle de la ZAC ;
- Troisième étape : Définition d'une stratégie aéroclimatique à l'échelle de l'ilot.
- Quatrième étape : Définition d'une stratégie aéroclimatique à l'échelle des bâtiments ;
- Cinquième étape : Finalisation du plan de masse de la ZAC ;
- Sixième étape : Révision du PLU avec intégration des OAP aérauliques entres autres.

7.1 Première étape : Définition de scénarii urbains initiaux Juillet 2011 :

Ces scénarii initiaux (voir Figure 4- 37) permettent une première visualisation des intentions urbaines majeures, schéma viaire, positionnement des bâtiments et espaces publics, répartition du programme bâti, jardins.... Il s'agit là d'une première « visualisation » du programme élaboré en tout début d'étude et proposant deux variantes fonctionnelles. C'est ce document qui a servi de base de dialogue avec l'ingénieur aéraulique.

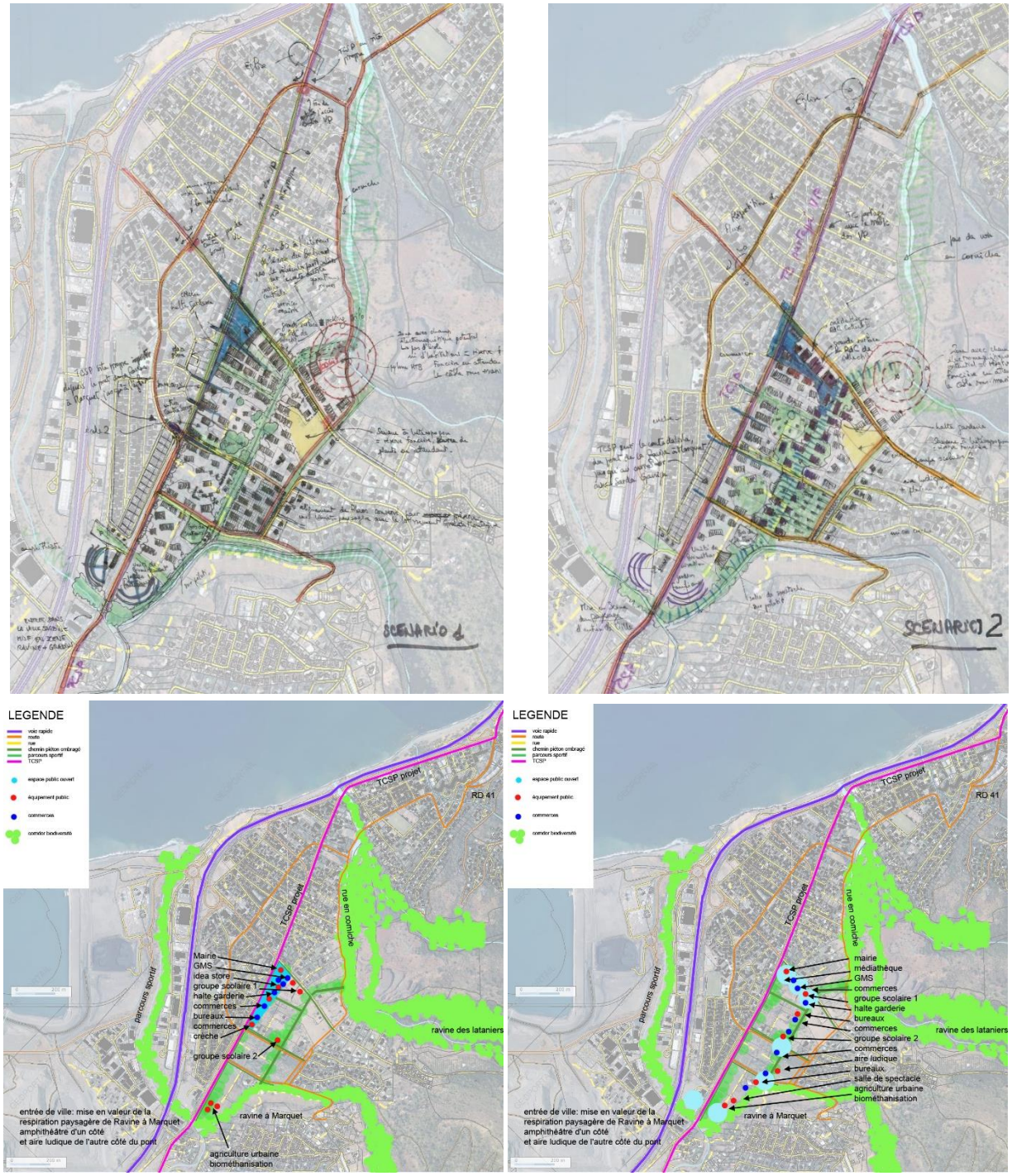


Figure 4- 37: Scénario 1 en haut et en bas à droite, scénario 2 en haut et bas à gauche

On y voit formalisée de manière distincte la zone commerciale en bleu et le futur mail tropical en vert. Ils sont distincts dans le scénario 1 et connectés dans le scénario 2.

7.2 Deuxième étape : Définition d'une stratégie aéro-climatique à l'échelle de la ZAC : Septembre 2011

Dans cette deuxième étape, un principe général d'organisation du bâti basé sur la seule prise en compte de l'optimisation du potentiel aéraulique est esquissé. Il y montre une répartition non continue et en quiconce en plan des volumes bâtis perpendiculairement aux brises diurnes et nocturnes (voir Figure 4- 38), en prenant en compte des principes d'inter distance D entre bâtiments, par rapport à la hauteur H de ceux-ci avec D>5H pour les bâtiments en partie basse. Une organisation en épis en partie médiane et des villas en partie haute.

Figure 4- 38: Schéma d'intention initial (© J Gandemer)

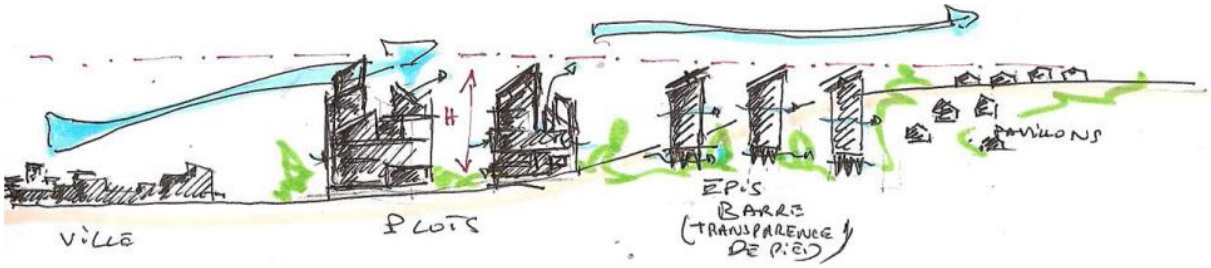


Figure 4- 39: Organisation en coupe avec un épannelage prenant en compte les effets topographiques (© J Gandemer)

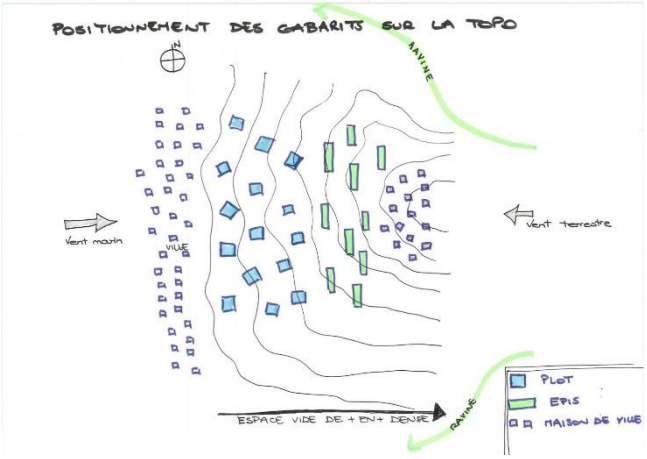


Figure 4- 40: Transcription de principe, en plan, des typologies proposées (© J Gandemer)

Le concept s'est ensuite affiné (voir Figure 4- 39) en envisageant de réduire les inter-distances entre plots en utilisant la dépression de toiture (puit dépressionnaires). Ceci permet de proposer un principe final (voir Figure 4- 40) avec des inter-distances se réduisant à mesure que la hauteur des bâtiments diminue dans la pente.

Ces premiers éléments de la stratégie aéro-climatique considèrent la formalisation de la prise en compte de la topographie, de la rugosité environnante, de l'organisation de la granulométrie bâtie et d'ébauche de forme bâtie (en particulier la proposition de toiture mono pente dos aux vents dominants diurnes, optimisant le potentiel de dépression et donc de ventilation traversante).(Gandemer, 2011) C'est un travail à la macro échelle de la ville, du quartier.

7.2.1 Limites apparues sur les règles de base d'organisation urbaines :

L'approche ci-dessus a montré les limites des concepts de base (voir Figure 4- 41).
En effet, étudier un objet architectural en tant que tel et améliorer son efficacité en ventilation naturelle et par là réduire, voire supprimer, les besoins en climatisation est une chose, l'appliquer à un ensemble de bâtiments avec la prise en compte de leurs interactions en est une autre. Cette approche déjà théorisée et décrite dans les grands principes d'interaction de bâtiments les uns par rapport aux autres, synthétisée dans (F Picgirard - J Gandemer, 2012) et dans les autres études citées précédemment, ne permet pas à priori, de concevoir une ville ou un quartier de densité raisonnable. En s'en tenant aux principes simples définissant la distance minimale entre deux bâtiments permettant de retrouver le potentiel de ventilation initial au vent du premier bâtiment, les écarts entre bâtiments sont incompatibles avec la densité attendue dans ce genre d'opération du fait des impératifs de rareté et de cherté du foncier.

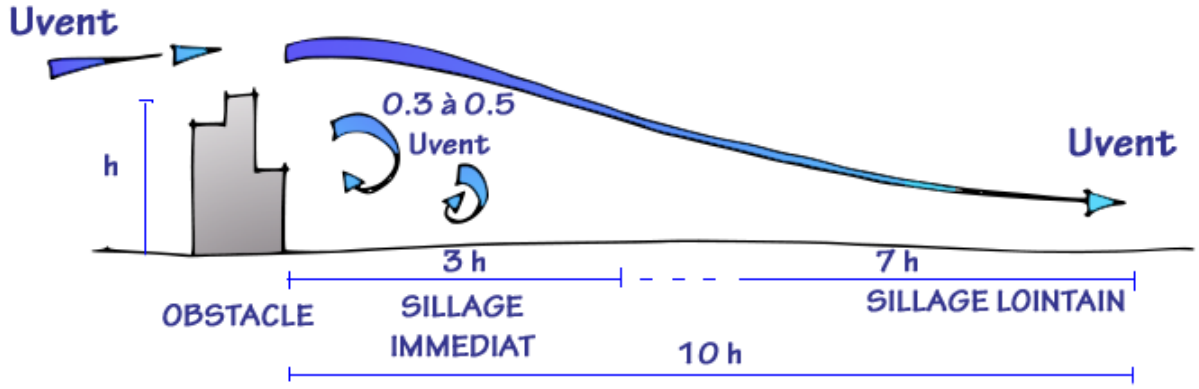


Figure 4- 41: Croquis sillage d'un obstacle bâti – (© F. Picgirard, J. Gandemer, 2012)

Notre objectif a donc été d'aller plus loin pour proposer des solutions opérationnelles c'est-à-dire viables, tant en termes d'image urbaine, que de densification et donc économiquement. Il fallait « resserrer » les plots en partie basse et donc valider de nouveaux concepts. Il est donc apparu nécessaire d'approfondir nos connaissances sur les interactions entre formes bâties et l'optimisation de ces formes bâties elles-mêmes, afin de définir des fonctionnements à l'échelle de l'îlot, préservant et optimisant le potentiel de ventilation **pour tous.**
Une étude a été commandée au laboratoire Eiffel associé à Jacques Gandemer Conseil.(Gandemer, 2011). Elle avait pour but de nous apporter des éléments de réponse aux échelles suivantes :

- A l'échelle des ilots sur l'organisation des volumes bâtis entre eux en prenant en compte les interactions (effet de masque, disposition des bâtiments les uns par rapport aux autres, bâtiments alignés, en quinconce). (Voir Figure 4- 43) ;
- A l'échelle des bâtiments sur la typologie architecturale la mieux adaptée au contexte (plot, plots avec patios fermés, U, bâtiment sur pilotis ou non, variabilité des hauteurs). (Voir Figure 4- 42) ;
- A l'échelle des cellules dans un bâtiment pour évaluer les vitesses d'air et au final le potentiel de confort apporté par cette ventilation naturelle.

Les sorties attendues de cette étude étaient des coefficients de pression C_p et des vitesses d'air en façade des cellules de logement pour en apprécier le potentiel de confort (voir 4.1.1). Ceci nous a donc amené aux étapes suivantes :

7.3 Troisième étape, définition d'une stratégie aéroclimatique à l'échelle de l'ilot et définition des interactions entre ilots et forme bâties, décembre 2011

Différentes formes bâties (patio dépressionnaire, U ouvert…) ont été testées associées entre elles (voir Figure 4- 43) afin d'en déterminer les plus efficaces et dans quelles conditions d'inter distance.

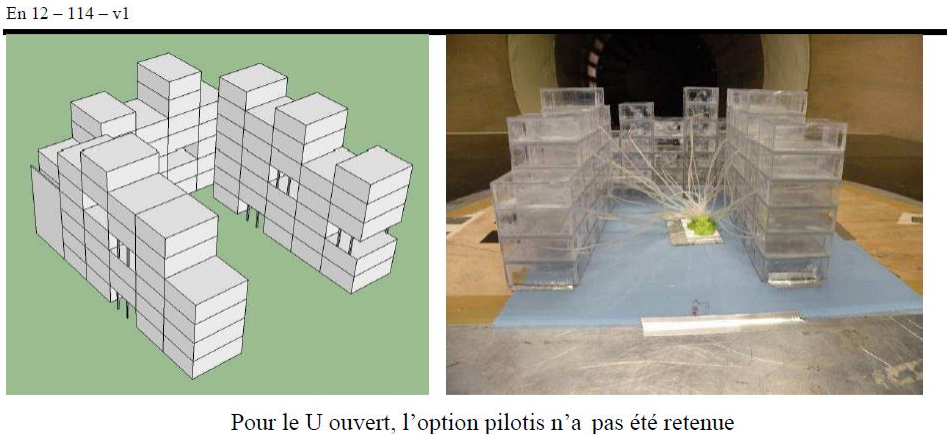


Figure 4- 43: Maquette d'étude en soufflerie pour simulation à l'échelle du bâtiment- (©J Gandemer)- (© Laboratoire Eiffel)

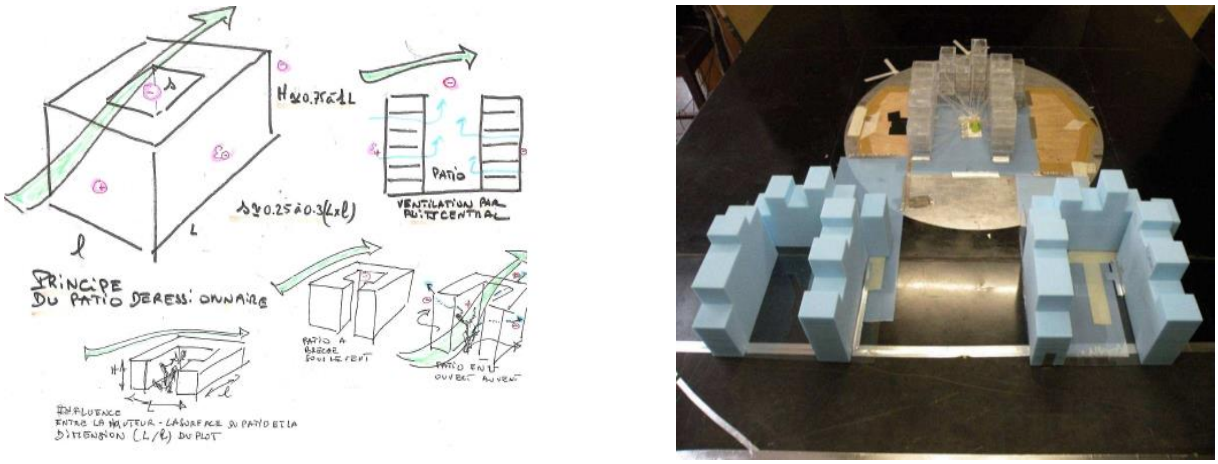


Figure 4- 42: Croquis et schéma conceptuels à l'échelle du bâti (à droite) – J Gandemer – maquette d'étude en soufflerie interactions entre bâtiments à l'échelle de l'ilot (©J Gandemer)- (© Laboratoire Eiffel) (à gauche)

C'est le bâtiment en U ouvert vers les vents dominants avec une variation des hauteurs qui a été retenu comme la forme la plus appropriée (voir Figure 4-43) tant au niveau aéraulique qu'architectural (voir annexe 10 Chapitre 4).

7.4 Quatrième étape, définition d'une stratégie aéroclimatique à l'échelle des bâtiments.

Le travail s'est ensuite porté sur la forme bâtie elle-même afin de l'optimiser. Le U ouvert retenu, nous avons testé différentes répartitions d'ouvertures avec ou sans pilotis (Voir Figure 4- 42).

En parallèle de ce travail, nous avons essayé de visualiser la transcription architecturale de cette forme de principe (voir Figure 4- 44). On note la volonté de hauteurs non uniformes sur le U, de trame fine traversante et les dimensions principales : 18m largeur de l'ouverture du U et 30m largeur du bâtiment. Il s'agit ici de passer d'une volumétrie théorique à un travail sur la forme architecturale fonctionnelle et viable. Ce travail de transposition est donc essentiel.

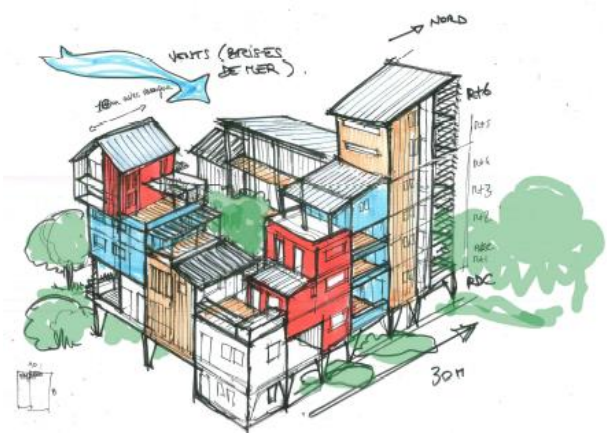


Figure 4- 44: Schéma concept architectural – (© LEU Réunion)

On retrouve en conclusion des points évoqués précédemment :

- -L'importance d'une bonne connaissance des conditions de vent, pour permettre de réduire les incertitudes sur le potentiel initial et donc le potentiel final (on peut souligner ici le manque de précision de la donnée vent sur le site qui amène une plus grande incertitude due à l'approche de recalage utilisée et la nécessité évoquée d'une étude complémentaire);
- -Le rappel des trois dimensions de la ventilation naturelle et en cas d'impossibilité d'utiliser pleinement la ventilation naturelle de confort avec des taux de renouvellement d'air supérieurs à 50 vol / heure, de se « rabattre » sur la ventilation naturelle d'évacuation de surcharge thermique et d'obtenir la vitesse d'air de 1m/s par des brasseurs d'air. Ce qui est préconisé dans certains cas pour ce projet ;
- -L'adoption d'un vélum (hauteur moyenne bâtie) non homogène. On évitera ainsi, un vélum constant type hauteur maximale à R+4, qui se traduit par une « nappe » homogène, moins favorable à l'efficacité en ventilation naturelle (voir Figure 4- 45) ;
- -Ces préconisations ne constituent pas le projet urbain, bien sûr, mais elles en précisent certaines contraintes à respecter pour pouvoir atteindre l'objectif de conception d'une ville tropicale jardin, durable, une éco-cité tropicale.

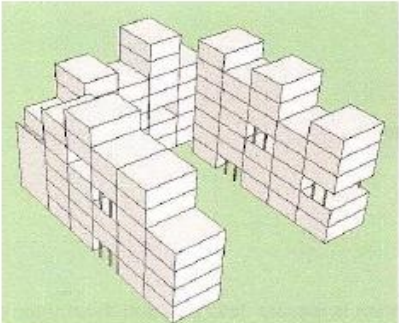


Figure 4- 45: Illustration d'un bâtiment en U a hauteur non homogène. ©J Gandemer

Finalisation du plan masse :

Les volontés urbaines et les conclusions de l'étude en soufflerie nous ont amené à proposer le plan masse final ci-dessous.

On est loin ici de l'urbanisme Haussmannien, d'îlots fermés à l'alignement, ou d'un urbanisme de zonage avec alignement sur voies. On retrouve la répartition des typologies de plots, barres et individuels, avec la formalisation du concept de U ouverts vers les vents dominants diurnes et on perçoit l'importance du végétal en périphérie des bâtiments en complément de la stratégie aéraulique. (Voir Figure 4- 46). Les inter-distances des plots sont ici clairement plus faibles que dans les premiers schémas d'intention et ce grâce au travail en soufflerie.

On retrouve aussi la répartition typologique prenant en compte la topographie, bâtiments en U en pied de site, en barre en quinconce en partie intermédiaire et les maisons individuelles en partie haute.

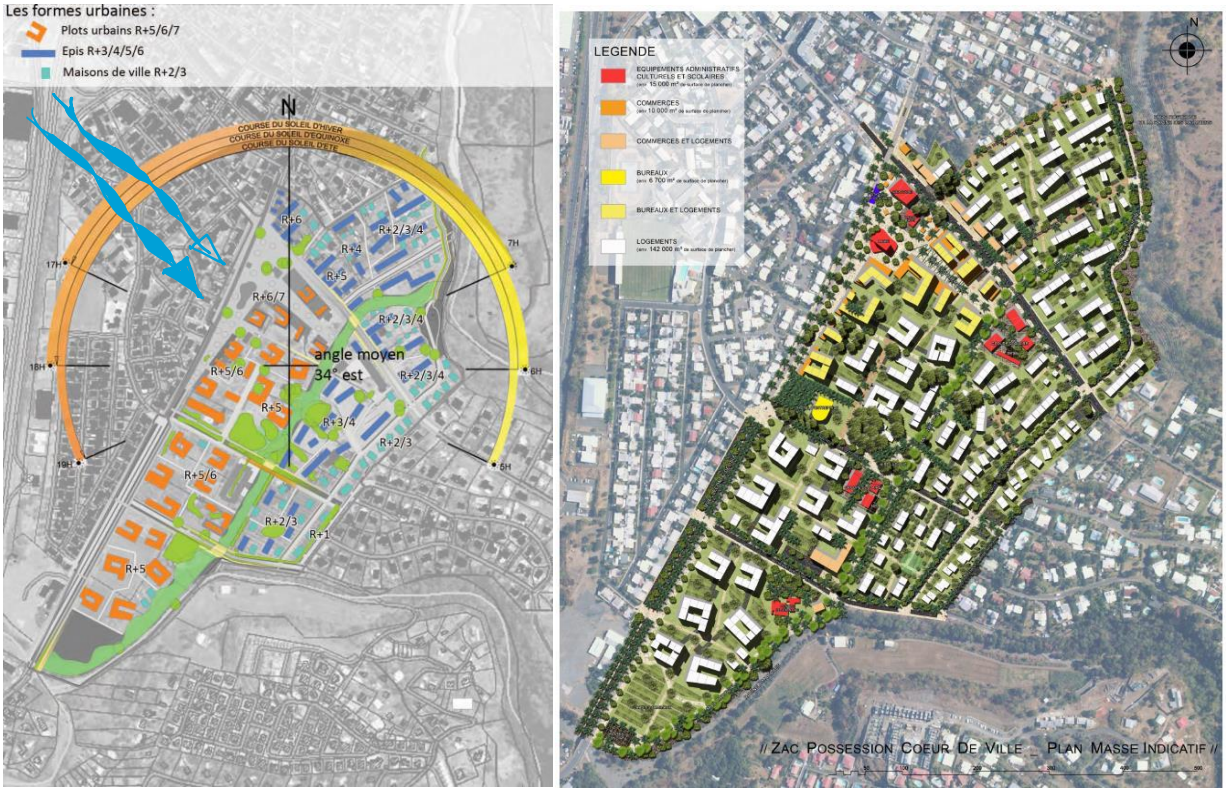


Figure 4- 46: Plan masse final de la ZAC, épannelage (à gauche) aménagements (à droite) – (© LEU Réunion)

Il apparait donc que les hypothèses aérauliques et les volontés programmatiques, architecturales et urbaines permettent d'organiser un plan d'urbanisme éolien théorique avec une densité moyenne à l'îlot de 76 logements/ha soit un COS de 0,6 environ, correspondant à une densité courante (voir Figure 4- 47) pour un ensemble d'habitat collectif et répondant aux objectifs de rentabilité énoncés par Steffen Lehmann dans (Lehmann, 2010) atteint avec une densité supérieure à 70 logts/ha.

Réflexion sur la densité :

Type	Habitat individuel isolé	Habitat individuel groupé	Habitat individuel en bande	Habitat collectif peu dense	Ensemble d'habitat collectif	Ensemble d'habitat collectif dense
Schéma						
Logts/ha	Moins de 5	Environ 10	De 15 à 60	De 40 à 80	De 50 à 150	Plus de 150
Consommation foncière/ha	3 300 m²	1 250 m²	550 m²	166 m²	100 m²	67 m²
Hab./ha	Moins de 7	Moins de 20	De 30 à 140	De 90 à 180	De 115 à 345	Plus de 345

Habitat individuel <5 lgt/ha

Case Demete - AP Architectures

Habitat individuel groupé ~ 10 lgt/ha

Ligne des Bambous - AP Architectures

Habitats collectifs peu denses 40 à 80 lgt/ha

Roche Topaze - AP Architectures

Figure 4- 47: Schéma et illustration de l'analyse comparative des densités, illustrations théoriques (au-dessus) et photos de références (en dessous) – (© Leu Réunion)

Nous allons maintenant voir comment transcrire ce plan dans un règlement transposable, transmissible et opposable pour arriver à un quartier ou une ville réelle et fonctionnelle.

7.5 Cinquième étape : Transcription réglementaire, la révision du PLU et les OAP :

La définition d'une organisation aéro-climatique vue ci-dessus, doit pouvoir être traduite à l'échelle réglementaire pour être transposée et utilisée par les architectes et maître d'œuvre, tout en étant « contrôlée » par le maitre d'ouvrage et son AMO (Assistant Maître d'Ouvrage). Ceci doit permettre d'éviter les écueils énoncés précédemment et donc que ces intentions ne se retrouvent pas dans les projets. Dans le cadre de la ZAC de Cœur de ville La Possession, l'outil réglementaire utilisé a été la révision du PLU et plus précisément les OAP (Orientations d'Aménagement et de Paysage) (Voir dossier ZAC CV réglementaire en annexe 10 chapitre 4). En parallèle et en complément du PLU et ses OAP, un référentiel DD, incluant des recommandations (aspect pédagogique + outil d'aide à la conception) et des prescriptions (aspect règlementaire) a été établi en collaboration avec le bureau d'étude TRIBU, Alain Bornarel, à l'origine de la HQE © en France. Il n'est pas opposable mais a servi d'outil pédagogique auprès des architectes en charge des différents projets.

7.5.1 Les OAP intégrées à la révision du PLU.

L'objectif des OAP est de préciser les intentions urbaines et environnementales, elles constituent le cadre réglementaire à respecter dans le contexte de la révision du PLU qui a été nécessaire pour la ZAC. Pour cela, nous nous appuyons sur le document officiel, (Ministère du logement et de l'habitat durable, 2015), qui définit ces outils.
En annexe 10 chapitre 4 le Dossier RSP ZAC CV OAP partie II présente le document final des OAP inclus au PLU, détaillant les prescriptions par ilots, entre autres.

7.5.2 Application de la méthode avec un exemple d'analyse d'un projet à l'échelle de l'ilot

Nous allons ici présenter comment les intentions urbaines et aérauliques ont été transcrites dans ces documents et les mesures d'accompagnement mises en place.
Ensuite nous verrons comment ces OAP ont été transcrites dans les projets des architectes.
Cette phase a été réalisée dans le cadre de la mission de suivi de la ZAC ; mission complémentaire de maitrise d'œuvre confiée à LEU Réunion (voir Figure 4- 49).

7.5.3 Exemple : d'OAP

L'îlot choisi est le plus avancé de la ZAC, il s'agit de l'îlot 11. Il a été subdivisé en trois, ilot A, B et C. Nous présentons ci-après avec en parallèle les préconisations des OAP et les projets des architectes. Sur la Figure 4- 49 on peut noter les prescriptions diverses générales, c'est à l'échelle du « sous ilot » (voir Figure 4- 50, Figure 4- 51) que l'on trouve les prescriptions aérauliques avec l'organisation des bâtiments, leur typologie (U ouvert, bandes en quinconce), et l'organisation traversante à respecter par rapport aux vents dominants et les protections solaires. La Figure 4- 48 donne un aperçu en image de synthèse des bâtiments projetés, on y retrouve les typologies en U ouvert avec la variabilité des hauteurs et l'orientation des toitures pour favoriser l'écope à l'extraction.

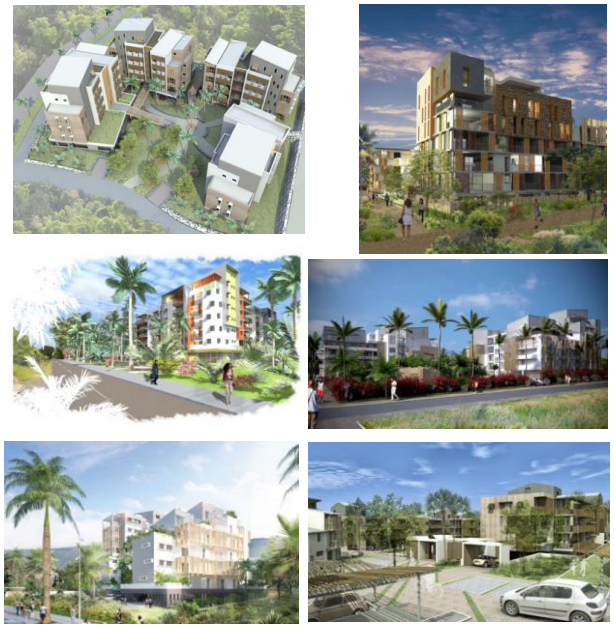


Figure 4- 48: Projets architectes, pour Ilot 11 – A. (© Bocquée), (© H. Lucas), (© T&T, architectes)

SURFACE en m²		26 098
HAUTEURS		Moy : R+5 (50%) Max : R+7 (10%)
LOGEMENT	nombre	259
	Surface de Plancher en m²	19 425
	densité nb de logts par ha	99,3
PRINCIPE DE MIXITE		60% maximum de logement aidé
COMMERCE Surface de Plancher en m²		520
BUREAU Surface de Plancher en m²		0
ESPACE OUVERT AU PUBLIC		une traversée N/S une traversée E/O une aire de stationnement de 38 places et une placette devant les commerces
ACCES VEHICULE maximum		2 accès depuis la nouvelle voie E/O 3 accès depuis le chemin bœuf mort
STATIONNEMENT		sous l'emprise du bâtiment 80% minimum
SURFACE PERMEABLE		35% minimum en pleine terre
ESPECES A PRESERVER absolument		6 Palmiers royaux (Roystonea venezuelana)
ESPECES A PRESERVER autant que possible		3 Vacoas (Pandanus) 3 Palmiers multipliants (Dypsis lutenens 5 Palmiers sp.

Figure 4- 49: Extrait OAP, Îlot 11-(© LEU Réunion)

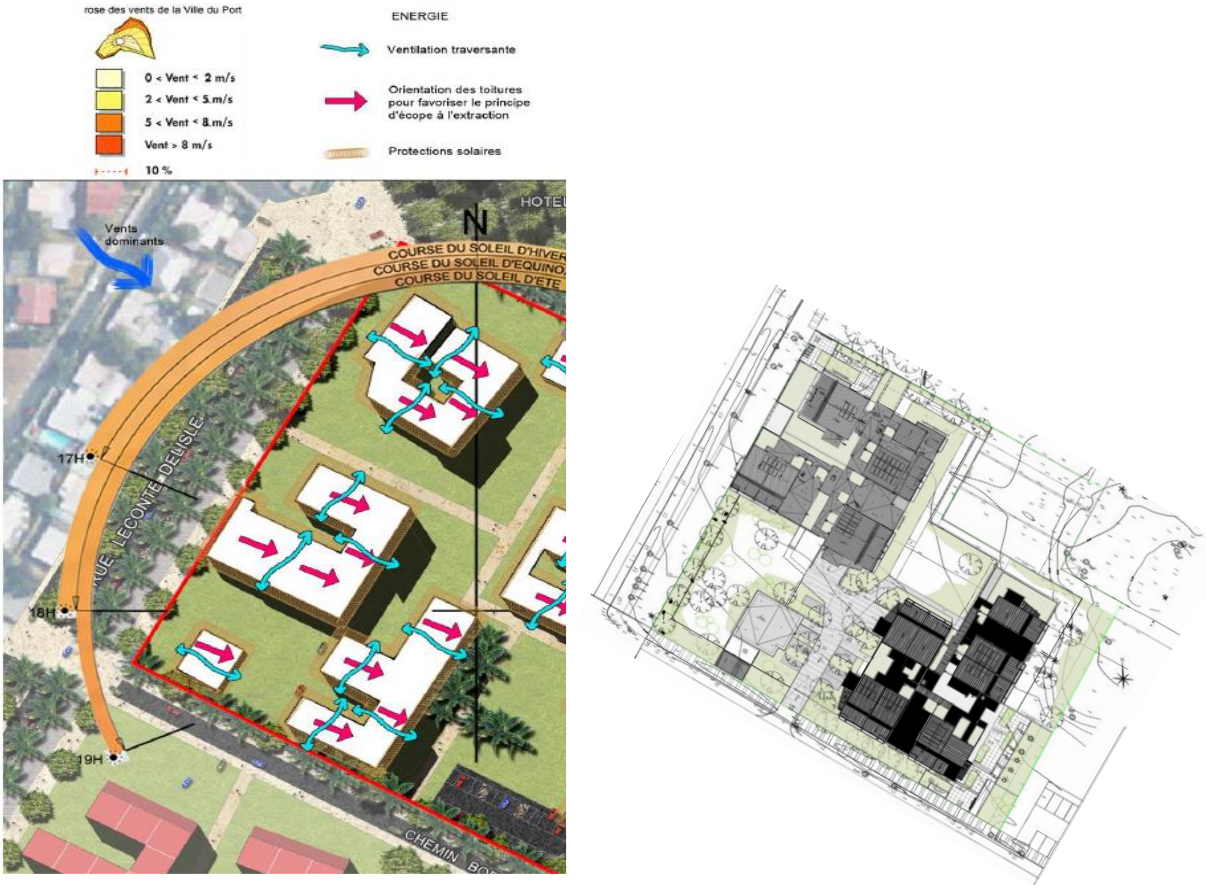


Figure 4- 50: Extrait fiche OAP (© LEU Réunion) (à gauche) – Transcription projet (© H Lucas, A Bocquée architectes) (à droite)

Figure 4- 51: Extrait plan masse fiche OAP (© LEU Réunion) (à gauche) – Transcription projet (© Néo architectes) (à droite)

7.5.4 Analyse critique des exemples de conception d'ilots par les architectes:

Îlot 11A (voir Figure 4-50), le bâtiment le plus au Nord a bien repris la typologie de U fermé, par contre celui au Sud ne respecte pas la fermeture du U et ne bénéficiera pas de la « bulle » de haute pression permettant d'irriguer les branches du U. Il y a risque de dysfonctionnement pour celui-ci.

Ilot 11C, (voir figure 4-51)on retrouve bien la proposition d'un plan masse en plots, leurs proportions (en particulier leur épaisseur) respectent les prescriptions, par contre la disposition en quinconce est moins marquée et risque de pénaliser les lots sous le vent qui sont nettement déventés par les brises diurnes.

7.5.5 Exemple spécifique d'analyse faite sur un projet d'architecte :

Nous avons aussi analysé, sur la base d'un ilot et d'un projet précis, la transcription des prescriptions réglementaires et en particulier sur les aspects aéraulique et de la ventilation naturelle.
Projet choisi îlot 11 opération Orchidées T&T architectes (voir Figure 4- 52).

Figure 4- 52: Plan masse opération orchidée – (© T&T architectes)

	indicateur	exigence	ESQ _ mai 2013	PC _ septembre 2013	PRO _ août 2015	PC Modif _ mars 2017	
ENERGIE ET CLIMAT							
implantation et orientation	QUAL		Proposer un schéma de ventilation des cellules et penser des dispositifs qui favorisent la ventilation traversante. Cf propositions variantes de positionnement aéraulique des immeubles plots - se rapprocher de la forme urbaine des OAP (plots en quinconce ou U ou L ouverts vers le secteur des brises du nord à l'ouest)- la position des bâtiments en fond de scène dévente les "arrières" malgré les transparences - bonne approche de la ventilation traversante des logements et très bon travail sur les protections solaires- ne pas oublier les orientations montagne qui peuvent être très qualitatives!! **Croquis Jacques Gandemer :** le schéma qui fonctionne le mieux n'est pas celui des variantes.	Plan masse inchangé depuis l'esquisse: les remarques de Jacques Gandemer sont toujours à intégrer. Le front bâti dévente le groupe scolaire. La parcelle a la forme d'un L, avec une grande branche NNE/SSO, que nous appellerons Nord, et une petite branche ONO/ESE, que nous appellerons Est. Sur la branche Nord, le terrain naturel présente un dénivelé montant de l'Ouest vers l'Est, faible dans sa partie Nord (de 38 à 40), plus accentué dans sa partie Sud (de 37 à 41). La branche Est du L est montante sur sa diagonale de Ouest (cote 41) à Est (cote 44) De sorte que les parkings, aux cotes 38, 39 et 40 sur la branche Nord, 41 et 42 sur la branche Est devraient être ventilés naturellement sans problème.	Vérifier la distance entre les bâtiments Plot et Voie Nouvelle pour être conforme au PLU	Distance égale à 6.5m, conforme au PLU	
morphologie	QUAL				Variations dans les hauteurs. Le système en plot permet un éclatement des masses bâties. Percements entre les plots et bâtiment surélevé (parking en rdc) permet de minimiser le déventement du groupe scolaire.	Idem	

Figure 4- 53: Grille d'analyse des projets - référentiel DD – (© LEU Réunion)

La grille d'analyse (voir Figure 4- 53) est extraite de la grille d'analyse du projet faite dans le cadre de la mission complémentaire de maitrise d'œuvre d'avis sur les projets des architectes. Elle y mentionne une bonne prise en compte de la conception aérothermique des bâtiments et dans une moindre mesure, de la prise en compte du fonctionnement global de l'îlot, en particulier l'école, sous le vent, aura un potentiel fortement dégradé. La raison de ce semi échec ou semi succès est le manque de poids de l'avis de l'urbaniste qui n'était pas en mesure d'infléchir les choix des concepteurs par un avis conforme incontournable. On en revient à l'importance de la gouvernance. Ce constat s'est répété sur plusieurs îlots, en particulier suite à des permis modificatifs non soumis à l'urbaniste en chef et générant des dérives non contrôlées (densité d'îlot trop élevée, passerelles fermées bloquant la ventilation, garde-corps plein en béton réduisant l'efficacité de la porosité de la façade…).
Ce retour d'expérience illustre le rôle du facteur humain et les possibles dérives qui y sont liées, malgré la prise en compte de mesures fortes et précises (les OAP).

7.5.6 Vue globale à l'échelle de l'ilot 11 :

Le plan et la maquette de synthèse (Voir Figure 4- 54) regroupant les différents projets architecturaux en cours illustrent la transcription faite des contraintes réglementaires, architecturales et urbaines. On retrouve les préconisations des OAP, en particulier, l'organisation des bâtiments en U ou en semis décalés, ainsi que les distances entre bâtiments, les reculs à l'alignement et l'environnement paysager. A ce niveau d'avancement on peut déjà conclure que le travail réalisé en amont a porté ses fruits en partie. Pour arriver à ce résultat, des mesures d'accompagnement ont été prises. La bonne compréhension des objectifs était ici importante, pour cela, il a été organisé un séminaire avec les architectes chargés des différents projets afin de leur faire partager notre vision. La seule lecture des éléments réglementaires n'est pas toujours à même d'appréhender ceux-ci, surtout compte tenu de leur nouveauté. Cet aspect pédagogique a été sans doute fondamental. Un avis au niveau des esquisses a aussi permis de « recadrer » certains projets. Celui-ci s'est fait sur la base d'avis donnés sur une grille d'analyse reprenant les thématiques du référentiel DD.
Il reste la transcription précise à l'échelle des bâtiments qui a montré ses limites sur les exemples des ilots A et C au niveau des prescriptions aérauliques, ceci dû en partie, à un manque de gouvernance forte, à savoir, l'avis conforme incontournable de l'urbaniste en chef, malgré qu'il ait été prévu initialement et la technicité mal intégrée de l'expertise aéraulique par les architectes.

Figure 4- 54: Comparaison plan masse Leu Réunion (à gauche)- plan masse projets recollés (à droite) et maquette projets recollés (en bas) (© LEU Réunion)

7.5.7 Retour d'expérience

A ce stade du projet on peut d'ores et déjà tirer quelques conclusions opérationnelles :
Importance de la gouvernance : Un projet de ce type se déploie dans le temps, il faudra compter entre 10 et 20 ans pour que l'ensemble de la zone ait son visage final. Compte tenu des enjeux, des changements politiques et techniques, le rôle de l'urbaniste en chef est fondamental. En effet, c'est lui qui doit assurer le maintien des objectifs et de la cohérence d'ensemble. Son rôle et son autorité, issus d'une vision globale du projet, pour la réussite de l 'opération est incontournable.
Respect des objectifs initiaux : les projets en cours de réalisation (voir précédemment) respectent globalement les prescriptions urbanistiques, toutefois l'absence de gouvernance a généré des dérives, malgré les avis et alertes de l'urbaniste en chef, LEU Réunion. Le dispositif mis en place semble donc perfectible dans sa phase de mise en application.
Il reste à organiser un suivi pour évaluer les performances atteintes tant au niveau du confort que des consommations prévisionnelles. C'est bien seulement après ces constats que l'on pourra tirer des conclusions plus définitives sur les résultats. Le retour d'expérience d'un certain nombre d'éco quartier a parfois été décevant (Blanchard, 2017) :
« En 2008, les premiers immeubles sont livrés et le bureau d'étude Enertech entame des campagnes de mesure, qui vont durer plus de deux ans. La première série de mesure est "en demi-teinte" : les résultats montrent que la consommation réelle est en très en dessous des consommations de l'époque, mais dépasse encore de 5% à 7% supérieure l'objectif fixé, soit 85 kWh/m2/an. Les immeubles venaient d'être livrés et les habitants n'avaient pas encore bien pris les choses en main. Le bureau d'étude pointe, d'une part, des erreurs techniques - l'étanchéité à l'air n'étant pas toujours optimale par exemple -, d'autre part, les comportements inappropriés de certains habitants qui surchauffent ou sur ventilent leurs appartements. »
Cependant grâce à ce constat des mesures correctives ont pu être apportées et ont permis de se rapprocher, voire de les atteindre ».
Le suivi sur toute la durée des études, puis en phase occupée sur au moins une année complète, apparait donc fondamental pour donner à ce type de projet innovant le maximum de chance de réussite. La temporalité de notre travail ne permet malheureusement pas d'avoir recueilli de données post occupationnelles. Il est néanmoins prévu un suivi qui sera mis en œuvre dans le cadre de la labellisation éco quartier et qu'il sera intéressant d'intégrer à la suite de cette étude pour en tirer tous les enseignements (instrumentation inscrite au PLU, eau et électricité mesurées par la société TEEO, études de confort en cours).
Suite à ces constats, des mesures correctives ont été apportées dans la méthodologie de suivi des projets afin d'améliorer le respect des objectifs initiaux, en particulier au niveau aéraulique :

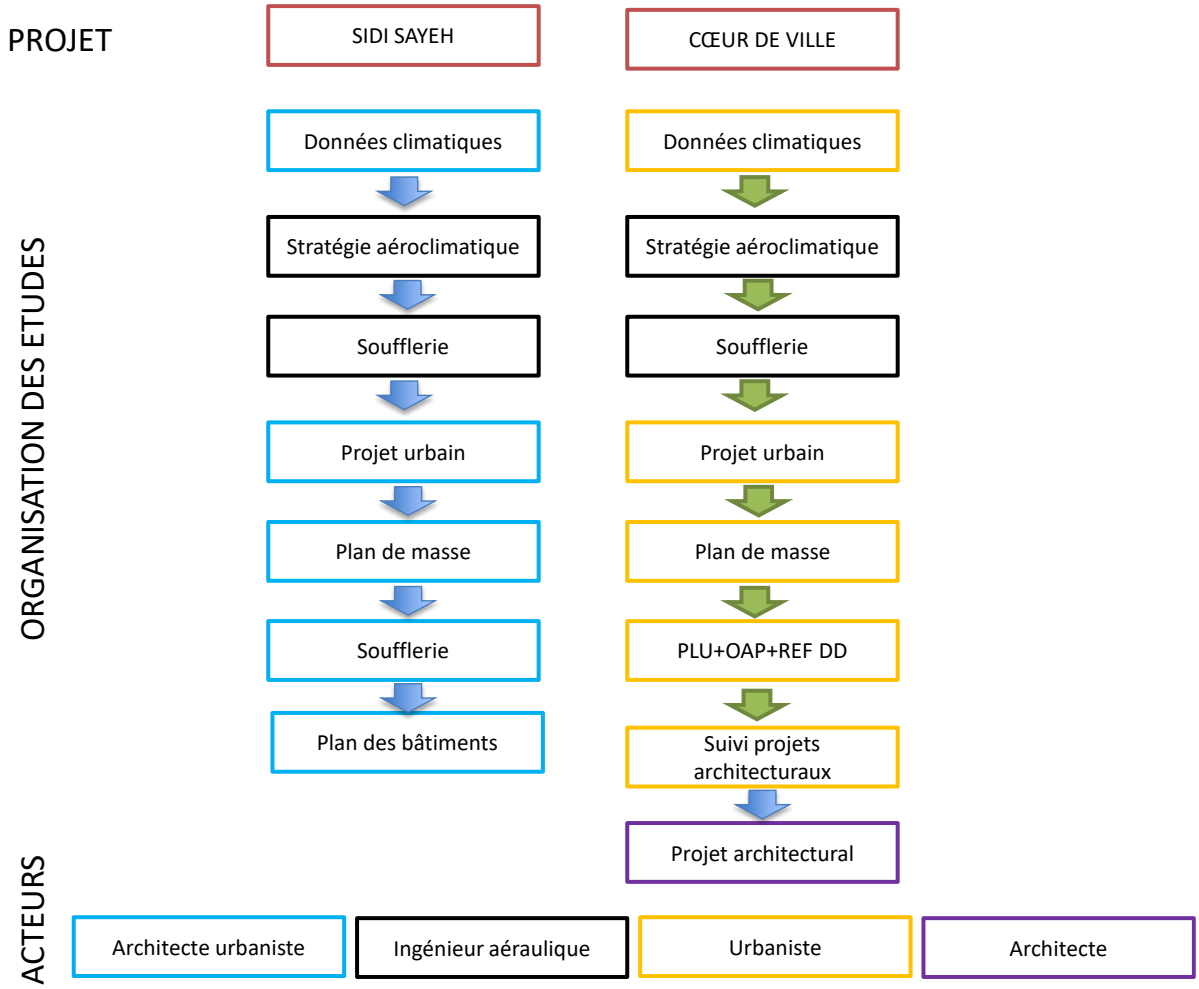
- Intégration du référentiel DD remodelé dans le PLU le rendant ainsi opposable ;
- Mise en place d'un conseil en ingénierie aéraulique obligatoire en phase esquisse dans les projets des architectes ;
- Avis conforme de l'urbaniste en chef dès l'esquisse intégrant une notice aéraulique obligatoire.

Ces mesures nouvelles seront évaluées au terme de la tranche 2 de travaux.

8 Conclusion

La littérature et les exemples analysés nous ont montré l'intérêt et les limites de la prise en compte de la ventilation naturelle à l'échelle urbaine. A l'exception de la ville nouvelle de Sidi Sayeh, aucun cas recensé ne pousse la réflexion de la « ville éolienne » jusqu'à l'échelle du potentiel de ventilation des bâtiments constituant ces villes ou ces quartiers. Il manque donc un maillon essentiel à la « chaine de la ventilation naturelle » pour assurer le confort des habitants. Pour le cas de Sidi Sayeh, le rôle d'urbaniste et architecte de l'équipe de concepteurs a permis d'éviter l'écueil de la transcription des intentions d'aménagement dans la formalisation architecturale (voir Tableau 4- 1).

Tableau 4- 1: Comparaison des démarches de conceptions entre SIDI SAYEH et CŒUR DE VILLE LA POSSESSION



Fort de ces constats nous pouvons proposer une méthodologie pour l’élaboration et le respect d’un projet urbain aéroclimatique de l’échelle urbaine aux règles de constructions à l’échelle des constructions de l’ilot, en voici les principales phases identifiées dans l’étude de cas :

Données préalables

- Données programmatiques ;
- Recueil et utilisation des données climatiques ;
- Recalage climatique précis de la donnée vent.

Elaboration du projet

- Définition d’une stratégie aéroclimatique en parallèle du projet urbain ;
- Finalisation du projet urbain ;
- Travail aéraulique à l’échelle de l’ilot ;
- Travail aéraulique à l’échelle du bâtiment.

Transcription réglementaire

- Définition d’une organisation générale en plan masse.
- Transcription réglementaire dans les données générales du PLU
- Réalisation d’OAP à l’échelle de l’ilot.

Suivi du projet

- Etablissement d’un référentiel DD.
- Accompagnement des maitres d’ouvrages et des maitres d’œuvre
- Suivi des projets à tous les stades d’étude et jusqu’à leur finalisation.
- Instrumentation

Suivi en mode occupé

- Information des occupants aux bons usages
- Suivi des consommations
- Analyse des comportements
- Mesures correctives (éventuellement)

L’ensemble du jeu des acteurs est résumé dans la Figure 4- 55 ci-après.

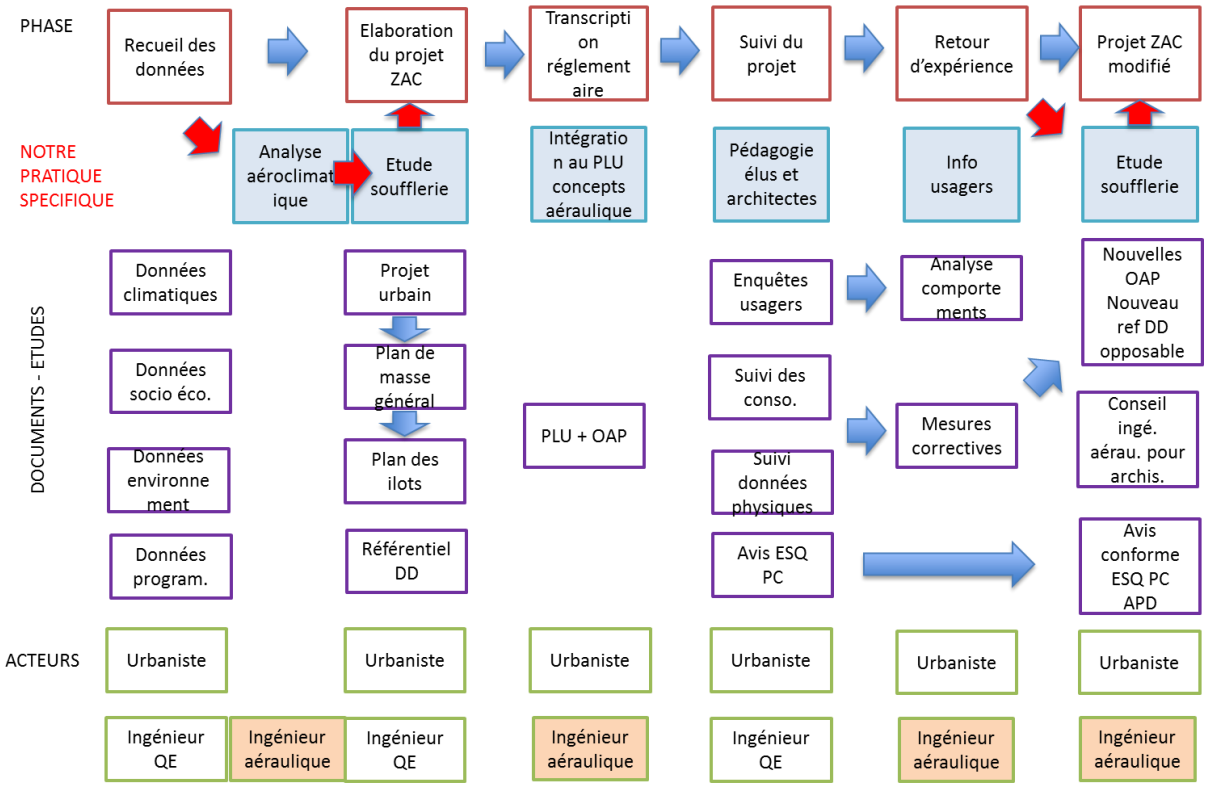


Figure 4- 55: Evolution des méthodologies d'étude et jeux des acteurs avec l'apport spécifique de l'ingénierie aéraulique

Nos apports et pratiques spécifiques (voir Figure 4- 55) dans le cadre de cette démarche d'étude ont été décisifs et innovants à deux niveaux : La méthode de conception avec l'expertise aéraulique et la transcription règlementaire de cette étude aéraulique dans le PLU, par l'intermédiaire des OAP.

La transcription réglementaire a montré ici ses limites, elle est possible, nécessaire, mais pas suffisante. La transcription architecturale de l'ilot 11, s'éloignant parfois des intentions initiales, en est une illustration. Un avis conforme du concepteur avant validation du permis de construire et dans les phases finales de conception apparait indispensable pour éviter les écueils décrits ci-dessus. L'intégration du conseil aéraulique auprès des concepteurs dès la phase esquisse est un second apport nécessaire. On en revient une fois de plus au facteur humain et au comportement.

Il est important de souligner que chacune des phases est essentielle à la bonne réussite du projet, sans parler de tous les autres aspects techniques, réglementaires et de concertation, nécessaires eux aussi. On peut rapprocher cette succession de phases à la « chaine de ventilation naturelle » vue dans les chapitres précédents, ou chaque maillon est essentiel à la réussite finale d'un projet.

Ces objectifs doivent être partagés par toute la chaine décisionnelle et en particulier le maître d'ouvrage, qui pourra ou devra le déléguer à son urbaniste en chef, en fonction de ses possibilités, faute de quoi les intentions initiales, aussi bonnes soient-elles, risquent d'être dévoyées sur l'autel de la rentabilité immédiate, antinomique avec la notion même de développement durable.

Un retour d'expérience au travers des enquêtes et de l'instrumentation est prévu dans un futur proche pour évaluer l'efficience des dispositifs, les dysfonctionnements, leurs origines et les

mesures correctives à envisager. Ce travail pourra faire l’objet d’un prolongement de cette étude.

La ville tropicale de demain n’est pas une chimère, elle devra proposer son propre idéal, modelé par un contexte original, dans lequel, incontestablement, la ventilation naturelle aura un rôle essentiel à jouer, mais elle ne se fera pas sans la collaboration et l’adhésion de tous les acteurs.

9 Bibliographie

(Ahmad et al., 2005)	Ahmad, K., Khare, M., Chaudhry, K.K., 2005. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 93, 697–717. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.04.002
(Ahmad Zaki et al., 2012)	Ahmad Zaki, S., Hagishima, A., Tanimoto, J., 2012. Experimental study of wind-induced ventilation in urban building of cube arrays with various layouts. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 103, 31–40. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.008
("Architecture d'Aujourd'hui n°3," 1945)	Architecture d'Aujourd'hui n°3, 1945. pp.84-88.
(A'zami, 2005)	A'zami, 2005. Bagdir in traditional Iranian architecture. Presented at the Internationnal Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment," Santorini - Greece.
(Beckers, 2012)	Beckers, B. (Ed.), 2012. Solar energy at urban scale. ISTE Ltd. ; John Wiley & Sons, London : Hoboken, NJ.
(Blanchard et al., 2010).	Blanchard, B., Ferrucci, M., Gandemer, J., 2010. Programme de développement d'une ville bioclimatique en Libye et approche expérimentale sur maquettes en soufflerie (No. EN-10-103).
(Blanchard, 2017)	Blanchard, L., 2017. Premier bilan pour l'écoquartier de Bonne à Grenoble [WWW Document]. Au service des territoires. URL http://www.caissedesdepotsdesterritoires.fr/cs/ContentServer?pagename=Mairie-conseils/MCExperience/Experience&cid=1250262978144 (accessed 10.15.17).
(Blocken, 2014)	Blocken, B., 2014. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 129, 69–102. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.03.008
("Cairns plan - Planning Scheme policy - Tropical Urbanism," 2016)	Cairns plan - Planning Scheme policy - Tropical Urbanism, 2016.
(Chan et al., 2003)	Chan, A.T., Au, W.T.W., So, E.S.P., 2003. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality—part II: multiple canopies and canyons. Atmospheric Environment 37, 2761–2772. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00252-8
(Chang, 2016)	Chang, J.-H., 2016. A genealogy of tropical architecture: colonial networks, nature and technoscience, The architext series. Routledge, London ; New York.
(Chen et al., 2017)	Chen, L., Hang, J., Sandberg, M., Claesson, L., Di Sabatino, S., Wigo, H., 2017. The impacts of building height variations and building packing densities on flow adjustment and city breathability in idealized urban models. Building and Environment 118, 344–361. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.042
(Cipriano et al., 2017)	Cipriano, X., Gamboa, G., Danov, S., Mor, G., Cipriano, J., 2017. Developing indicators to improve energy action plans in municipalities: An accounting framework based on the fund-flow

	model. Sustainable Cities and Society 32, 263–276. https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.004
(Colombert, 2010)	Colombert, M., 2010. Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville 541.
(Colombert, 2008)	Colombert, M., 2008. Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville (phdthesis). Université Paris-Est.
(Conseil d'Etat, 2011)	Conseil d'Etat, 2011. La légalité de l'acte de création d'une ZAC n'est pas subordonnée au respect du POS/PLU alors en vigueur. Mais qu'en est-il du dossier de réalisation de la zone ? - JURISURBA [WWW Document]. URL http://jurisurba.blogspirit.com/archive/2011/08/24/la-legalite-de-l-acte-de-creation-d-une-zac-n-est-pas-subord.html (accessed 7.10.19).
(DGFIP, 2017)	DGFIP, 2017. L'aménagement urbain | Collectivités locales [WWW Document]. URL https://www.collectivites-locales.gouv.fr/lamenagement-urbain (accessed 7.10.19).
(Direction générale de L'Aménagement, du Logement et de la Nature, 2016)	Direction générale de L'Aménagement, du Logement et de la Nature, 2016. Ecocité la démarche.
("Eco-cité Zenata," 2016)	Eco-cité Zenata, 2016.
(Emmanuel, 2016)	Emmanuel, M.R. (Ed.), 2016. Urban climate challenges in the tropics: rethinking planning and design opportunities. Imperial College Press, London ; New Jersey.
(F Picgirard - J Gandemer, 2012)	F Picgirard - J Gandemer, 2012. La ventilation naturelle en pratique.
(Gandemer, 2011)	Gandemer, J., 2011. Etude aérodynamique pour un urbanisme climatique du "centre-ville" de La Possession (Rapport d'étude aéraulique). Carquefou - France.
(Germano, 2006)	Germano, M., 2006. Qualitative modelling of the natural ventilation potential in urban context [WWW Document]. URL https://infoscience.epfl.ch/record/64372?ln=fr (accessed 5.9.17).
(Ghiaus and Allard, 2005)	Ghiaus, C., Allard, F., 2005. Natural ventilation of urban buildings - summary of URBVENT project. Presented at the International Conférence " Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment," Santorini - Greece, p. 33.
(Ghiaus et al., 2006)	Ghiaus, C., Allard, F., Santamouris, M., Georgakis, C., Nicol, F., 2006. Urban environment influence on natural ventilation potential. Building and Environment 41, 395–406. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.003
(Hang and Li, 2010)	Hang, J., Li, Y., 2010. Ventilation strategy and air change rates in idealized high-rise compact urban areas. Building and Environment 45, 2754–2767. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.004
(Harzallah, 2007)	Harzallah, A., 2007. Émergence et évolution des préconisations solaires dans les théories architecturales et urbaines en France, de la seconde moitié du XIXe siècle à la deuxième guerre mondiale
(Ignatius et al., 2015)	Ignatius, M., Wong, N.H., Jusuf, S.K., 2015. Urban microclimate analysis with consideration of local ambient temperature, external heat gain, urban ventilation, and outdoor thermal comfort in the tropics. Sustainable Cities and Society 19, 121–135. https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.016

(Lehmann, 2010)	Lehmann, S., 2010. The principles of green urbanism: transforming the city for sustainability. Earthscan, London ; Washington, DC.
(Michelin, 2016)	Michelin, N., 2016. Manifeste pour une nouvelle fabrication de la ville, par Nicolas Michelin. AMC.
(Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales, 2019)	Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités locales, 2019. Démarche et outils pour élaborer un Plan local d'urbanisme (PLU) et un PLUi [WWW Document]. Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales. URL https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/demarche-et-outils-pour-elaborer-un-plan-local-durbanisme-plu-et-un-plui (accessed 7.10.19).
(Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales, 2019)	Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales, 2019. Le SCoT : un projet stratégique partagé pour le développement de l'aménagement d'un territoire [WWW Document]. Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales. URL https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/le-scot-un-projet-strategique-partage-pour-le-developpement-de-lamenagement-dun-territoire (accessed 7.10.19).
(Ministère du logement et de l'habitat durable, 2015)	Ministère du logement et de l'habitat durable, 2015. Fiche technique : Les orientations d'aménagement et de programmation.
(Mirzaei et al., 2015)	Mirzaei, P.A., Olsthoorn, D., Torjan, M., Haghighat, F., 2015. Urban neighborhood characteristics influence on a building indoor environment. Sustainable Cities and Society 19, 403–413. https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.008
(Mohsen M. and sabah, 2011)	Mohsen M., A., sabah, A., 2011. Sustainable Cities : Strategy nad Indicators for Healthy Living Environments. Presented at the Worl Renewable Energy Congress 2011, Linköping - Sweden.
(Ng.E, 2009)	Ng, E., 2009. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. Building and Environment, The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation &Energy Conservation in Buildings (IAQVEC 2007), Sendai, Japan, 28-31 October, 2007 44, 1478–1488. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.013
(Olgyay et al., 2015)	Olgyay, V., Olgyay, A., Lyndon, D., Olgyay, V.W., Reynolds, J., Yeang, K., 2015. Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism, New and expanded edition. ed. Princeton University Press, Princeton.
(Ramirez, 2014)	Ramirez, E., 2014. Triangular blocks and wind tunnels: Augustin Rey's logic of air resistance: The Journal of Architecture: Vol 19, No 2 [WWW Document]. URL http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13602365.2014.918560 (accessed 6.10.17).
(Sandberg, 1979)	Sandberg, M., 1979. Building and Environment. Building and Environment 14, 69. https://doi.org/10.1016/0360-1323(79)90031-3
(Shi et al., 2016)	Shi, Y., Ren, C., Zheng, Y., Ng, E., 2016. Mapping the urban microclimatic spatial distribution in a sub-tropical high-density urban environment. Architectural Science Review 59, 370–384. https://doi.org/10.1080/00038628.2015.1105195
(Smuts Hon J.C., 1927)	Smuts Hon J.C., 1927. Holism And Evolution. Macmillan And Company Limited.

(Soulillou and Doutreuwe Salvaing, 1993)	Soulillou, J., Doutreuwe Salvaing, F. (Eds.), 1993. Rives coloniales: architectures, de Saint-Louis à Douala, 1. ed, Collection Architectures traditionnelles. Editions Parenthèses ; Editions de l'Orstom, Marseille : Paris.
(Stagno and Ugarte, 2006)	Stagno, B., Ugarte, J., 2006. Ciudades tropicales sostenibles. Instituto de Arquitectura Tropical, San José, C.R.
(Tzonis et al., 2001)	Tzonis, A., Stagno, B., Lefaivre, L. (Eds.), 2001. Tropical architecture: critical regionalism in the age of globalization. Wiley-Academic ; C. Fonds, Chichester ; New York : The Netherlands.
(Vitruvius and Perrault, 1979)	Vitruvius, Perrault, C., 1979. Les dix livres d'Architecture de Vitruve: corrigez et traduits nouvellement en François, avec des notes et des figures .. Mardaga, Bruxelles.
(Wen et al., 2017)	Wen, C.-Y., Juan, Y.-H., Yang, A.-S., 2017. Enhancement of city breathability with half open spaces in ideal urban street canyons. Building and Environment 112, 322–336. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.048
(Wissam, 2011)	Wissam, Y., 2011. Passive Cooling: Responding to Electricity Demand in the UAE [WWW Document]. Carboun: Advocating Sustainable Cities in the Middle East. URL http://www.carboun.com/sustainable-design/passive-cooling-responding-to-uae%e2%80%99s-soaring-electricity-demand/ (accessed 11.17.18).
(Yeang, 2008)	Yeang, K., 2008. Ecodesign: a manual for ecological design, 1. publ. in paperback. ed. Wiley, Chichester.

Conclusion générale

Photo aérienne ZAC Cœur de Ville La Possession

Du passé de l'architecture, au futur de la ville tropicale, voire de la ville des latitudes tempérées…une histoire à écrire.
La thématique de recherche de cette thèse avait pour but d'évaluer l'influence passée, présente et future de la ventilation naturelle dans l'évolution de l'architecture tropicale.
« S'il existe, bien entendu, des exemples de constructions dont on peut évaluer le très faible impact écologique, ces exemples ne peuvent être reproduits, par définition même. En effet, chaque réponse est unique et ne correspond qu'à un lieu, un seul programme, une seule culture. » (Jourda, 2012).
Cette affirmation qui pourrait paraitre au premier abord un peu désespérante, nous « condamnant » à devoir toujours adapter, innover, inventer, est au contraire un extraordinaire stimulant. Cependant certaines constantes dans la démarche doivent permettre d'éviter des errements et d'assurer un maximum de chance de réussite dans l'approche de conception de bâtiments et de quartiers en ventilation naturelle de confort en milieu tropical. De nombreuses études passées (Olgyay et al., 2015), (Givoni, 1994), ou plus récentes (Hyde and Docherty, 1997), (Garde et al., 2004), (Ghiaus and Allard, 2005) permettent une meilleure compréhension et prise en compte de ces problématiques.
Nous nous sommes donc posé les questions suivantes, au fil des différents chapitres ayant fait évoluer notre travail :

- Chapitre 1 : Un climat commun, ou pour le moins proche a-t-il pu produire des typologies architecturales originales et communes, malgré une forte disparité géographique et temporelle, à une époque ou la physique des bâtiments n'avait pas cours ? Pour quelles raisons ces solutions sont-elles communes ?
- Chapitre 2 : Quel confort thermique est-il obtenu par une maison traditionnelle représentative des archétypes locaux, dans quel contexte et avec quelles caractéristiques ?
- Chapitre 3 : Comment peut-on transposer les principes de l'architecture traditionnelle dans des projets contemporains avec des programmes et des contextes différents ? A travers deux études de cas, l'Ilet du Centre et le collège Bouéni, des outils prédictifs doivent-ils être systématiquement utilisés ou des règles de base peuvent-elles suffir et dans quel contexte pour obtenir le confort en ventilation naturelle?
- Chapitre 4 : Comment dans le contexte d'un changement d'échelle nécessaire du bâtiment à un urbanisme éolien peut-on préserver et garantir un droit à la ventilation naturelle ?

Dans le chapitre 1, l'analyse d'exemples passés, issus de la période que nous avons appelée « anté climatisation », autour du globe dans la zone intertropicale humide, dont l'île de La Réunion, nous a permis de constater une relation forte entre les archétypes et le potentiel de ventilation naturelle. Un travail analytique, monographique et comparatif d'architectures prémodernes, vernaculaires, coloniales a été réalisé sur des caractéristiques architecturales (plans, coupes, façades) et contextuelles (albédo, environnement). Il complète un travail existant sur l'architecture traditionnelle (Chandel et al., 2016), (GhaffarianHoseini et al., 2014), (Singh et al., 2011),(Al-Obaidi et al., 2014). Il a montré des tendances communes dans les exemples étudiés:

- Augmentation de la porosité et donc du potentiel de ventilation naturelle, à mesure que l'on se rapproche de l'équateur.

Il a aussi confirmé l'importance d'autres facteurs communs, participant au confort thermique et d'usage :

- Utilisation de matériaux à moindre inertie plus on se rapproche de l'équateur ;
- Omniprésence de la varangue, avec une multiplication croissante sur toutes les façades à mesure que l'on se rapproche de la latitude 0;
- Usage généralisé de protections solaires des façades, avec des variantes liées aux conditions climatiques : Débord de toiture hors zone cyclonique et auvent dans cette zone.

Il faut cependant relativiser cette explication sur l'usage des matériaux qui est complexe et s'explique aussi parfois avec des facteurs ethnologiques.
Il apparaissait intéressant, au-delà de ces constats, d'évaluer le potentiel de confort de ces archétypes. Ce travail a déjà été effectué dans de nombreuses études (Teoh Hui Yu, 2015), (Plemenka, 1994),(Ghafar, 2014), (Bay, 2001)… Mais il n'avait pas fait l'objet d'étude précise pour les cases traditionnelles de la Réunion, notre territoire d'étude et de travail.

Dans le chapitre 2, à partir de la détermination d'un archétype représentatif d'une maison traditionnelle réunionnaise, nous avons fait cette analyse qualitative dans l'étude de cas de la maison Levieux. Nous avons étudié le potentiel de confort et l'impact de l'environnement proche (micro climat local) sur celui-ci par des mesures de température, hygrométrie et de photo infra-rouge, in situ en période chaude. Il s'est avéré que la conception de cette maison, dans son environnement, permet d'être en confort thermique 95% du temps. Celui-ci est atteint, dans les conditions extrêmes, entre autre par l'usage de la ventilation naturelle et par l'usage de brasseurs d'air. L'étude ne permet toutefois pas de quantifier la part de l'un ou l'autre des usages. Elle a aussi mis en évidence l'impact favorable du végétal en périphérie de la construction et le rôle d'espace tampon de la varangue, archétype spécifique tropical, comme nous l'avons montré dans le chapitre 1 et donc le rôle du micro climat local périphérique. Enfin, la mauvaise isolation des combles et des usages inadaptés (pièces laissées fermées) ont montré leur influence négative sur le confort, avec des performances très dégradées sous comble et dans une moindre mesure dans la chambre Ouest inoccupée lors des mesures et donc moins ventilée.

Ces principes de conception aérothermiques de refroidissement passif : protection solaire performante, contrôle des charges thermiques internes, ventilation débitante, gérée et organisée, intégration des contraintes environnementales, peuvent-ils être transcrits dans des projets contemporains ? Nous avons pu voir que c'était le cas tant que les systèmes actifs n'avaient pas pris le pas sur la conception passive dans la littérature (Fry and Drew, 1974), mais avec les évolutions et contraintes actuelles est-ce toujours possible ?
C'est à cette question que nous avons essayé de répondre dans le chapitre trois avec deux études de cas, en s'appuyant sur des démarches similaires (Faggianelli, 2014), (Hyde and Docherty, 1997)
La seconde étude de cas, l'Ilet du Centre a montré que la transposition d'une maison individuelle à un immeuble urbain à R+4, avec :

- un contexte climatique favorable ;
- un potentiel élevé avec 50% du temps un vent de vitesse supérieure à 7m/s ;
- une conception sur la base de la « règle du pouce » et des recommandations ECODOM ;
- une bonne végétalisation des abords ;

- une conception aérothermique poussée (absence de rayonnement direct sur les façades, grâce au développement de la « varangue urbaine »), profondeur en plan réduite (inférieure à 12m).

On peut atteindre un confort de même niveau que la maison Levieux (première étude de cas), étudiée dans le chapitre 2, comparable par son contexte géographique et climatique. Les mesures de vitesse d'air, (qui n'ont pas été faites sur la première étude de cas) effectuées ont précisé que c'était grâce à la ventilation naturelle de confort et aux brasseurs d'air qu'il était atteint dans 97% du temps en été.
Les enquêtes de confort menées après une année complète ont aussi montré leur rôle en permettant d'apporter des dispositifs correctifs (rédaction et diffusion de mode d'emploi, création du bac à compost pour gérer les nuisances olfactives) et les limites du concept (gestion de l'acoustique et nécessité de bonnes pratiques).

La seconde, le collège de Bouéni (troisième étude de cas), a montré que malgré un contexte climatique plus contraint :

- Avec un signal vent ou 69% du temps les vitesses de vents sont supérieures à 2,50m/s ;
- avec des conditions météo plus extrêmes (en particulier hydrométriques) ;
- en utilisant les mêmes concepts initiaux que pour l'Ilet du Centre ;
- en s'appuyant sur des études en soufflerie à couche limite pour optimiser le fonctionnement en ventilation naturelle ;
- en utilisant des STD pour l'optimisation thermique de l'enveloppe.

On peut affiner la conception et espérer des résultats satisfaisants en termes de confort. Il reste toutefois à valider ces perspectives par une pédagogie de bonnes pratiques auprès des utilisateurs futurs et effectuer des mesures de POE (Post Evaluation Occupancy) pour une confirmation finale. Les interactions entre les bâtiments, avec la nécessité d'une stratégie différenciée (puit dépressionnaire) pour ceux sous les vents dominants (bâtiment A), ont aussi mis en évidence l'influence de l'environnement du bâti proche. Nous nous sommes alors questionné sur l'éventuelle incidence négative en cas d'évolution de celui-ci. C'est bien l'importance du respect et de la prise en compte de la « chaine de ventilation naturelle » et ses différentes échelles qui a été montré dans ce chapitre :

- La climatologie régionale ;
- Le signal et ses caractéristiques ;
- La topographie du site et son environnent immédiat ;
- Le site et l'urbanisme environnant le bâtiment ;
- La forme architecturale ;
- L'organisation du flux d'air dans la zone de vie.

Un autre enseignement est qu'il n'existe pas une méthode universelle d'étude d'un bâtiment contemporain en milieu tropical, le degré de complexité du contexte climatique, le potentiel de vent, le site et le programme amènent à une utilisation différenciée d'outils ayant fait leurs preuves : L'expérience vécue, la règle du pouce, l'outil PERENE, l'étude en soufflerie et les STD.
Ce constat nous a amené au questionnement final de cette thèse, la nécessité de faire un changement d'échelle pour assurer la pérennité d'une conception en ventilation naturelle de

confort et voir comment il est transposable dans des règles opposables. En effet la littérature est riche sur la thématique de l'aéraulique urbaine, (Ahmad et al., 2005), (Andy T. Chan,William T.W. Au,Ellen S.P. So, 2003), (Ghiaus and Allard, 2005),(Germano, 2006), (Wen et al., 2017), mais peu sur l'aspect transcription réglementaire à l'image de ("Cairns plan - Planning Scheme policy - Tropical Urbanism," 2016). Ceci nous a conduits dans le chapitre 4 à réfléchir sur le concept de la ville tropicale au travers l'étude du quartier Cœur de Ville de La Possession et à développer le concept de la **« ville éolienne »,** du **droit à la ventilation naturelle** et de sa transcription dans des règles d'urbanisme.

La recherche bibliographique ne nous a pas permis, à l'exception notable de la ville nouvelle de Sidi Sayeh (Blanchard et al., 2010) de trouver des exemples ou le lien entre la forme urbaine, facilitant la ventilation naturelle des espaces et les bâtiments intégrés dans cette trame, profitant de ce potentiel, semble clairement établi, ou si il l'est, il n'est pas quantifié, malgré une littérature riche et complète sur la ventilation naturelle des villes.
La démarche de co-conception, développée dans le chapitre 4 a montré son efficacité par l'étroite collaboration, dès la genèse du projet entre l'urbaniste et l'ingénieur conseil. Elle a permis de définir des principes d'organisation et de forme du bâti optimisant le potentiel de ventilation naturelle de l'ensemble des bâtiments constituant la ZAC Cœur de Ville, grâce à une étude en soufflerie à couche limite ayant permis de définir des formes bâties optimisées par leur géométrie et leurs positions respectives.
La question de la transcription réglementaire, à la suite de la réflexion de (Colombert, 2010) s'est alors posée. Il fallait pouvoir assurer la pérennité dans le temps des concepts développés et les rendre opposables au risque, sinon, qu'ils ne soient pas mis en œuvre.
Elle s'est réglée dans :

- L'inscription de ces règles dans le PLU ;
- La transcription dans les OAP annexée au PLU ;
- La mise en place d'un référentiel DD ;
- Un suivi des projets des architectes des ilots par un urbaniste en chef.

L'analyse opérationnelle de la réalisation de l'ilot 11, a montré comment ont été suivis ces concepts rendus opposables.
L'insuffisance de pouvoir de l'urbaniste en chef (gouvernance de projet) a révélé ses limites en permettant certaines dérives qui auraient pu être évitées :

- non optimisation de certaines formes urbaines ;
- effets de masque non maitrisé par l'absence d'étude aéraulique poussée ;
- mauvaise optimisation de la conception thermique de l'enveloppe.

Des mesures et enquêtes in situ, une fois les premiers ilots achevés devront permettre de tirer toutes les conclusions de cette expérience innovante en cours. Celles-ci devraient amener à tirer toutes les conclusions de cette première tranche et en obtenir des enseignements transposables pour la suite du projet ou dans d'autres contextes (travail en cours).
Les enjeux sont de taille au regard des défis que nous sommes amenés à relever dans les décennies à venir. Il n'est pas inutile de se souvenir qu'une partie des concepts et approches développés et analysés précédemment peuvent être appliqués sous des latitudes plus hautes et ce d'autant plus que les perspectives de réchauffement climatiques risquent fort de rendre la prise en compte du confort en saison chaude plus prégnante.
On peut donc affirmer sans détours que la ventilation naturelle de confort a bien influencé l'évolution de l'architecture tropicale. Au-delà de ce constat, il apparait plus important de

souligner qu'elle devra continuer à modeler les architectures et les villes de demain, tropicales ou tempérées, pour apporter ce confort tant convoité avec un maximum d'efficacité et un minimum de dépense énergétique.

Notre apport avec ce travail de recherche a permis :

- De mieux comprendre, au travers l'étude d'exemples, l'influence du contexte tropical humide dans l'architecture, en particulier de l'adaptation de la porosité de manière croissante à mesure que l'on s'approche de l'équateur, de l'importance de l'archétype de la varangue et son nombre croissant là encore à mesure que l'on s'approche de la latitude 0° ;
- De montrer avec quels principes architecturaux (orientation, porosité, aménagement extérieur, protection solaire, matériaux, ventilation traversante), une maison traditionnelle vernaculaire réunionnaise atteint le confort en ventilation naturelle ;
- D'expliciter, au travers deux études de cas, dans quel contexte, avec quel résultat et quelles limites, utiliser des outils simples (des règles simples et la règle de pouce) ou des outils plus sophistiqués (la soufflerie physique et les STD) pour atteindre le confort en ventilation naturelle ;
- Et enfin surtout, comment garantir de préserver dans le temps le potentiel de ventilation naturelle d'un bâtiment dans une trame urbaine (une organisation bâtie prenant en compte l'aéraulique urbaine et des bâtiments étudiée en soufflerie physique) et avec quel outil réglementaire (le PLU et ses OAP) en explicitant notre travail et ses conclusions sur une étude de cas : la ZAC Cœur de ville de La possession.

  Ceci nous a permis d'élaborer le concept de « ville éolienne » et de « droit à la ventilation naturelle ».

Ce travail ouvre des perspectives en termes de recherche :

- Nous avons démontré qu'il est vain d'isoler les différents éléments constituant le design d'un bâtiment ou d'un quartier. La ventilation naturelle qui en est un des composants nécessaire, mais pas suffisant, a influencé et devra influencer ces concepts pour envisager de réduire durablement les impacts, dépenses énergétiques et rendre les villes denses plus viables, moins émissives et moins consommatrices d'énergie. Des retours (POE) sur le collège Bouéni permettraient de vérifier l'efficience de ce travail, comme nous avons pu le constater sur l'Ilet du Centre ;
- La transcription dans l'urbanisme réglementaire « éolien » et du « droit à la ventilation naturelle » qui en découle, est sans doute une piste nouvelle de prise en compte et d'application de cette recherche qui risquerait de rester au niveau des bonnes intentions sans cette possibilité. Un suivi de la ZAC Cœur de Ville dans ses derniers développements pourrait enrichir ce travail et en améliorer l'efficience ;
- **En aucun cas cela ne pourra se faire sans prise en compte du facteur humain**, (ENERTECH, 2011), (Heitz, 2019) , maillon faible de la chaine et pour lequel seule la pédagogie semble en mesure d'influencer durablement les comportements. Un investissement fort dans cette pédagogie semble donc indispensable et reste à mettre en place.

Nous espérons que cette thèse servira cette cause et apportera « sa pierre à l'édifice du savoir » en permettant de mieux préciser des méthodologies de prise en compte de la ventilation naturelle en milieu tropical et de bénéficier de tous ses bienfaits.

« Autant en emporte le vent » C'

(Margareth Mitchell).

Bibliographie

(Ahmad et al., 2005)	Ahmad, K., Khare, M., Chaudhry, K.K., 2005. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 93, 697–717. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.04.002
(Al-Obaidi et al., 2014)	Al-Obaidi, KaramM., Mazran, I., Abdul Malek, A.R., 2014. Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. ELSEVIER, Frontiers of Architectural Research Volume 3, Issue 3, 283–297.
(Andy T. Chan,William T.W. Au,Ellen S.P. So, 2003)	Andy T. Chan,William T.W. Au,Ellen S.P. So, 2003. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality [WWW Document]. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231001002126
(Bay, 2001)	Bay, J.-H., 2001. Cognitive biases in design: the case of tropical architecture. Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde, Delft.
(Blanchard et al., 2010)	Blanchard, B., Ferrucci, M., Gandemer, J., 2010. Programme de développement d'une ville bioclimatique en Libye et approche expérimentale sur maquettes en soufflerie (No. EN-10-103).
("Cairns plan - Planning Scheme policy - Tropical Urbanism," 2016))	Cairns plan - Planning Scheme policy - Tropical Urbanism, 2016.
(Chandel et al., 2016)	Chandel, S.S., Sharma, V., Marwah, B.M., 2016. Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions. Renewable and Sustainable Energy Reviews 65, 459–477. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.038
(Colombert, 2010)	Colombert, M., 2010. Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville 541.
(ENERTECH, 2011)	ENERTECH, 2011. Evaluation par mesure des performances énergétiques ds 8 bâtiments construits dans le cadre du proframme européen Concerto (rapport de synthèse).
(Faggianelli, 2014	Faggianelli, G.A., 2014. Rafraichissement par la ventilation naturelle traversante des bâtiments en climat méditerranéen. Université de Corse - Pascal Paoli, France.
(Fry and Drew, 1974)	Fry, M., Drew, J., 1974. Tropical architecture in the dry and humid zones. R. E. Krieger Pub. Co, Huntington, N.Y.
(Garde et al., 2004)	Garde, F., Adelard, L., Boyer, H., Rat, C., 2004. Implementation and experimental survey of passive design specifications used in new

	low-cost housing under tropical climates. Energy and Buildings 36, 353–366. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.045
(Ghafar, 2014)	Ghafar, A., 2014. Malay vernacular architecture [WWW Document]. malayvernacular.html. URL http://www.hbp.usm.my/conservation/malayvernacular.htm
(GhaffarianHoseini et al., 2014)	GhaffarianHoseini, AmirHosein, Berardi, U., Dahlan, N.D., GhaffarianHoseini, Ali, 2014. What can we learn from Malay vernacular houses? Sustainable Cities and Society 13, 157–170. https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.008
(Ghiaus and Allard, 2005)	Ghiaus, C., Allard, F., 2005. Natural ventilation of urban buildings - summary of URBVENT project. Presented at the International Conférence “ Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment,” Santorini - Greece, p. 33.
(Givoni, 1994)	Givoni, 1994. Buiding design principles for hot humid regions. Renewable Energy, Elsevier Science Ltd Vol5, part II, 908–916.
(Heitz, 2019)	Heitz, P., 2019. Comprendre le facteur humain. Agence Qualité Construction, Qualité Construction.
(Hyde and Docherty, 1997)	Hyde, R., Docherty, M., 1997. Thermal Performance of Housing in the Hot-Humid Tropics of Australia. Architectural Science Review 40, 105–112. https://doi.org/10.1080/00038628.1997.9697391
(Jourda, 2012)	*Jourda, F.-H., 2012. Petit manuel de la conception durable. Archibooks + Sautereau, Paris.*
(Olgyay et al., 2015)	*Olgyay, V., Olgyay, A., Lyndon, D., Olgyay, V.W., Reynolds, J., Yeang, K., 2015. Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism, New and expanded edition. ed. Princeton University Press, Princeton.*
(Plemenka, 1994)	Plemenka, S., 1994. l’aspect bioclimatique de l’habitat vernaculaire [WWW Document]. URL https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=l%27aspect+bioclimatique+de+l%27habitat+vernaculaire&btnG=
(Singh et al., 2011)	Singh, M.K., Mahapatra, S., Atreya, S.K., 2011. Solar passive features in vernacular architecture of North-East India. Solar Energy 85, 2011–2022. https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.05.009
(Teoh Hui Yu, 2015)	Teoh Hui Yu, 2015. Asian Architecture Case Study Report. Taylor’s University.
(Wen et al., 2017)	Wen, C.-Y., Juan, Y.-H., Yang, A.-S., 2017. Enhancement of city breathability with half open spaces in ideal urban street canyons. Building and Environment 112, 322–336. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.048

ANNEXES

ANNEXE CHAPITRE 1

ANNEXE 1 : Chapitre 1 : Définitions

ANNEXE CHAPITRE 3

ANNEXE 2 : Chapitre 3 : Facteurs solaires des toitures et enveloppe de l'Ilet du centre

ANNEXE 3 : Chapitre 3 : L'efficience énergétique de l'Ilet du centre

ANNEXE 4 : Chapitre 3 : Confort des différentes zones de mesure de l'Ilet du centre

ANNEXE 5 : Chapitre 3 : Evaluation des performances aérauliques de l'Ilet du centre

ANNEXE 6 : Chapitre 3 : Le comportement hygrothermique de l'Ilet du centre

ANNEXE 7 : Chapitre 3 : Les enquêtes de confort de l'Ilet du centre

ANNEXE 8 : Chapitre 3 : Rapport 15- 104 vn v1 aérodynamique Eiffel collège Boueni

ANNEXE 9 : Chapitre 3 : STD collège Boueni

ANNEXE CHAPITRE 4

ANNEXE10 : Chapitre 4 /Dossier rsp ZAC cœur de ville OAP

ANNEXE 1 chapitre 1

Définitions

Taux d'ouverture de façade et surface d'ouverture libre

Selon PERENE, qui est un outil d'aide à la conception à La Réunion à partir de règles simples:

Une façade d'un logement est un ensemble de parois verticales en contact avec l'extérieur composé de parois opaques et de baies ayant le même secteur d'orientation. Le taux d'ouverture de façade d'un logement est égal au rapport de la surface des ouvertures libre des baies à la surface de la façade du logement considérée (voir figure 6). La surface des ouvertures libres est la surface vue de l'intérieur de la pièce permettant le passage libre de l'air, baies et lames orientables en position ouverte (l'épaisseur des lames orientables ou fixes est négligée dans le calcul de cette surface) et les dispositifs mobiles de protection solaire déployés.

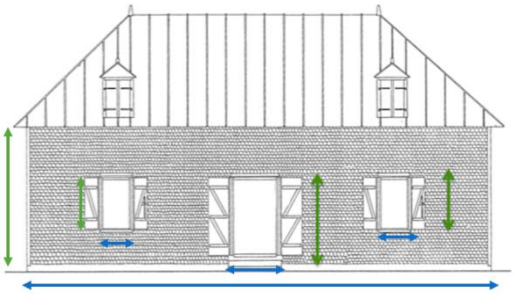


Figure 1 Calcul du taux d'ouverture : ratio de la surface totale d'une façade par la somme des surfaces libres des ouvertures

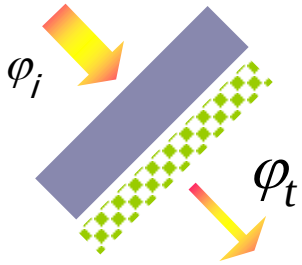
Porosité

Il n'y a pas une, mais des définitions, de la porosité appliquée au bâtiment. Elles sont issues, entre autres, d'ECODOM, PERENE ou de la RTAA (DEAL Réunion - Direction de l'Environnement, 2017). Elle se caractérise par un pourcentage illustrant un potentiel de ventilation naturel d'un local. Pour que ce potentiel soit réel, il faut prendre en compte la chaine de la ventilation naturelle (telle que définie en introduction de ce travail de thèse), entre autre l'organisation intérieure du niveau considéré. Par extension dans cette étude nous assimilerons porosité et taux d'ouverture des façades. La porosité agit directement sur le potentiel de confort en zone tropicale humide, (Hirano et al., 2006). En effet, elle participe du potentiel d'irrigation par équilibrage des pressions entre façades de pressions différentes et par là une vitesse d'air sur les occupants permettant d'améliorer la température ressentie (Bonneaud, 2004)

Facteur solaire

Le facteur solaire « S »: est le rapport de l'énergie transmise par la paroi à l'intérieur du bâtiment pendant les heures d'exposition à l'ensoleillement / l'énergie reçue par la paroi pendant les heures d'exposition à l'ensoleillement. Il est fonction de la couleur de la paroi, du pourcentage de paroi exposée au soleil et de sa résistance thermique (voir figure 7). Il représente la proportion du flux énergétique transmise par la paroi considérée (paroi + protection solaire). Sa valeur est un coefficient compris entre 0 et 1. Il mesure la contribution d'un vitrage à l'échauffement de la pièce. Plus le facteur solaire est petit, plus les apports solaires sont faibles. On distingue le facteur solaire des parois opaques et le facteur solaire des vitrages.

Facteur solaire des parois FTS:



□ = absorptivité de la paroi

$1/h_e$ = 0.05 (paroi horizontale)

$1/h_e$ = 0.06 (paroi verticale)

Valeurs RT Dom et PERENE

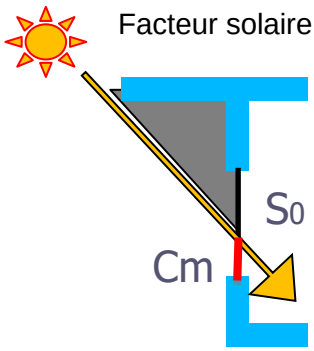
S < 0,02 toiture

S < 0,05 murs

Figure 2 Facteur solaire d'une paroi

$$FTS = \frac{\varphi_t}{\varphi_i} = \frac{\alpha U_g}{h_e}$$

Facteur solaire des vitrages S :



S = Cm x S0

Figure 3 Facteur solaire d'un vitrage

Coefficient de transmission surfacique

« U » : caractérise les déperditions thermiques d'un bâtiment vers l'extérieur. Le coefficient de transmission thermique d'une paroi est la quantité de chaleur traversant cette paroi en régime permanent, par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de la paroi.(LOCI, 2018)Le coefficient de transmission thermique est l'inverse de la résistance thermique totale (R_T) de la paroi.

$U = 1 / R_T$

> U (ou k) s'exprime en **W/m²K**

Plus sa valeur est faible et plus la construction sera isolée.

Cette caractéristique est utilisée en milieu tempéré et ne prend en compte que les transferts thermiques, d'où l'intérêt du facteur solaire défini ci-dessus en milieu tropical.

ANNEXE 2 chapitre 3

Facteurs solaires des toitures et enveloppe de l'Ilet du Centre

Tableau 1 Facteurs solaires des toitures et parois de l'Ilet du Centre

Type de paroi :	**Couverture métallique**
Complexe (int. vers ext.) :	Faux plafond + plenum + tôle acier + 60mm laine de roche + complexe mince réfléchissant Ondulit
Facteur solaire S :	0.02
Commentaire :	Réflexion du rayonnement solaire sur la surface extérieure par la finition aluminium naturel du complexe mince Ondulit. Très faible inertie thermique.

Type de paroi :	**Mur béton 18 cm – bardage métallique**
Complexe (int. vers ext.) :	Mur béton + plenum +lame d'air + complexe mince réfléchissant Ondulit
Facteur solaire S :	0.06
Commentaire :	Voile béton protégé du rayonnement direct.

Type de paroi :	**Mur béton 18 cm – bardage bois**
Complexe (int. vers ext.) :	Mur béton + plenum +lame d'air + bardage bois couleur naturelle 30mm
Facteur solaire S :	0.04
Commentaire :	Voile béton protégé du rayonnement direct.

ANNEXE 3 chapitre 3

L'efficience énergétique de l'ilet du centre

Comparer ce projet avec un autre bâtiment tertiaire du même type pourrait de prime abord paraitre intéressant, encore faudrait-il que cette comparaison soit significative ou représentative. Du point de vue du confort généré par la conception aérothermique, la grande variabilité des paramètres (macro et micro climat, environnement urbain, environnement proche, effets de masque…) ne semble pas permettre de tirer quelque enseignement à valeur universelle d'un comparatif dans la mesure ou tout ou partie de ces paramètres varieraient inévitablement et **c'est bien la toute la difficulté de l'application architecturale de concepts physiques avec un grand nombre de variables.**

Il nous apparait plus judicieux de présenter précisément le contexte et une analyse de ce projet afin d'en décrire la méthodologie, de bien le comprendre et d'en tirer des éventuels enseignements, et en évaluer la pertinence.

Cependant, certains critères objectifs, comme comparer la consommation énergétique finale par m² et par an de l'ilet du centre avec la consommation moyenne des bâtiments tertiaires de La Réunion et avec l'objectif de consommation des recommandations PERENE paraissent pertinents.

Les mesures

Il a été réalisé des mesures quotidiennes par comptage différentiel au tableau électrique, ce qui permet de préciser la consommation totale et par type d'usage (voir Tableau 2et Figure 4).

Tableau 2 : Comparatif de la consommation électrique, énergie finale tous usages par m² de surface utile (SU) entre l'Ilet du Centre et la consommation moyenne d'un bâtiment standard de bureaux à La Réunion

	Bâtiment bureaux standard (Réunion)	PERENE 2009	Ilet du Centre
Kwh/m²/an *	**140**	**98**	**63**
Surface climatisée	70%	70%	3%

*Consommation énergie finale tous usages, surface utile

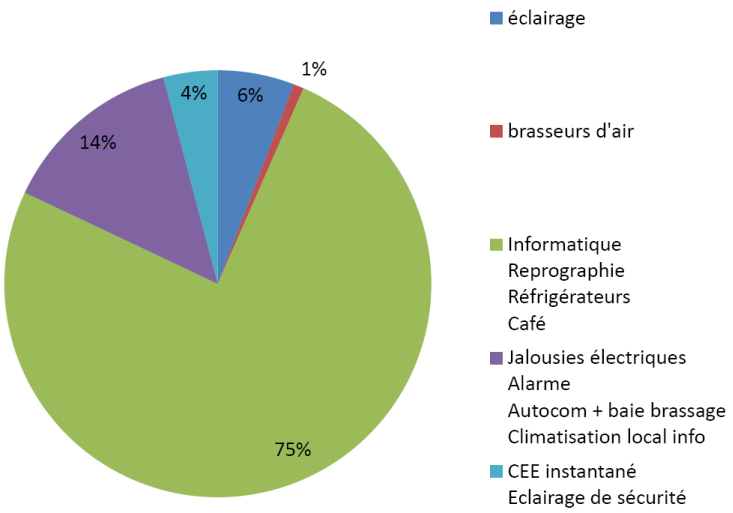


Figure 4 Camembert de répartition des consommations de l'Ilet du Centre par type d'usages

Conclusion sur l'efficience énergétique

Ces chiffres montrent l'efficience énergétique réelle du projet dont les bureaux consomment un peu plus de **deux fois moins** que des bureaux standards à La Réunion. Les différents dispositifs, dans leur ensemble, décrits ci-avant amènent un résultat probant et dont la généralisation, tant que faire se peut, permettrait des économies d'énergie, financières et d'émission de CO^2 significatives.

Il convient de s'assurer que ces consommations et les systèmes qu'ils alimentent, ont bien permis d'obtenir le confort dans les bureaux en période chaude. Pour cela nous proposons deux approches :

L'approche physique par le recueil de données température, hygrométrie et l'approche ressentie par la réalisation d'enquêtes auprès des utilisateurs.

ANNEXE 4 chapitre 3

Confort des différentes zones de mesure de l'Ilet du Centre :

Les mesures de 6 capteurs pendant les journées « type » du mois de mars 2018 sont reportées ci-après : dans le jardin central, sous la coursive, au RDC des bureaux, à l'étage, sous la varangue urbaine et dans l'espace minéral de l'autre côté de la rue.

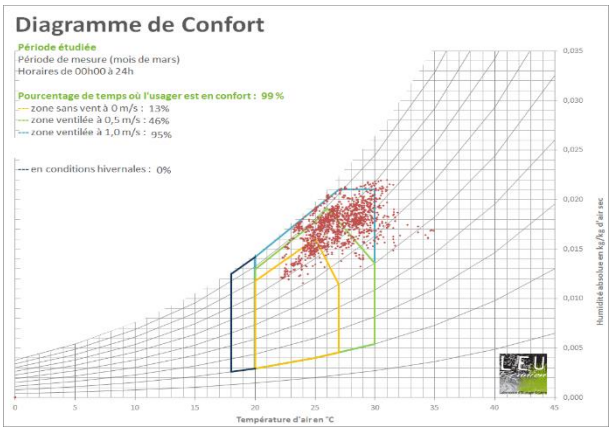


Figure 7 Caractérisation du climat par diagramme de Givoni à l'extérieur (capteur 22 coursive)

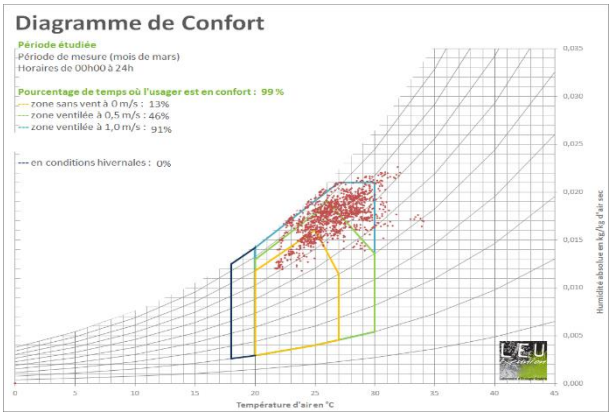


Figure 7 Caractérisation du climat par diagramme de Givoni à l'extérieur (capteur 15 varangue urbaine)

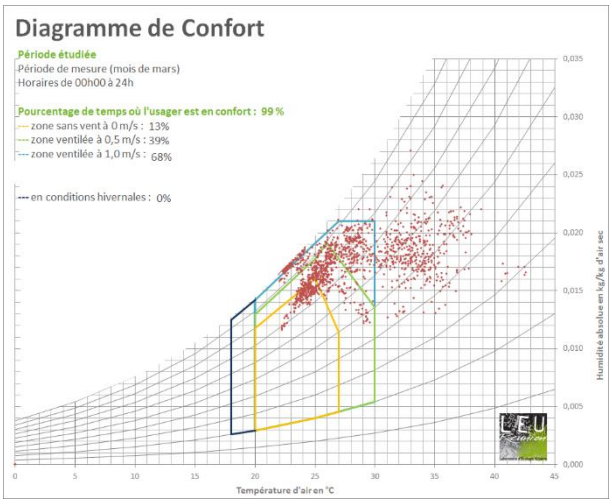


Figure 7 Caractérisation du climat par diagramme de Givoni à l'extérieur (capteur 56 milieu minéral)

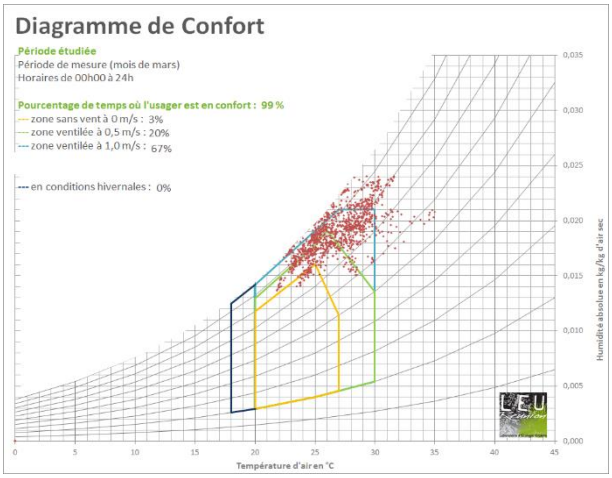
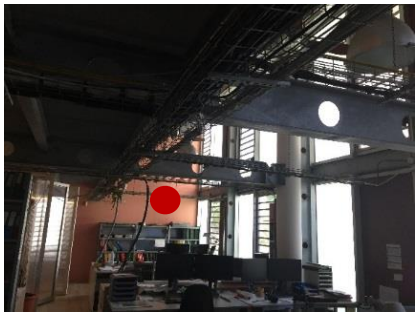


Figure 10 Caractérisation du climat par diagramme de Givoni à l'extérieur (capteur 57 jardin central)



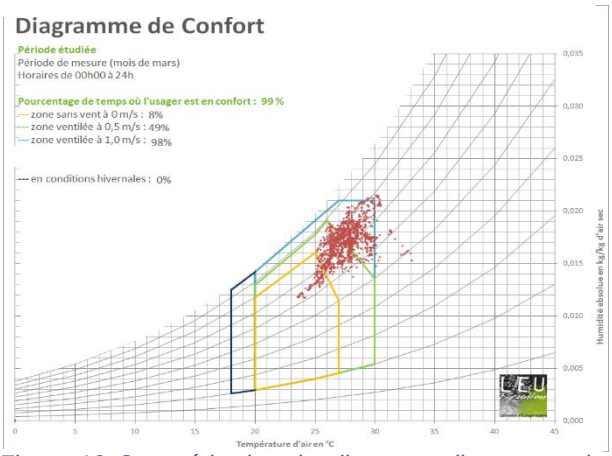
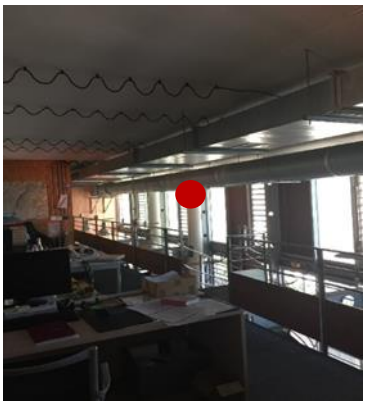


Figure 10 Caractérisation du climat par diagramme de Givoni à l'intérieur (capteur 25 bureaux LAB 1)



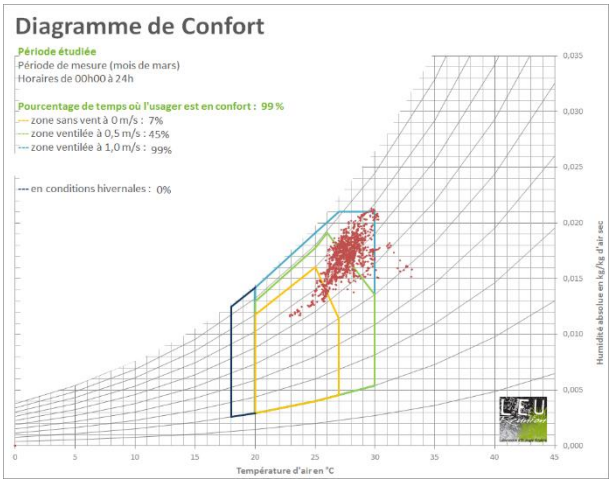


Figure 10 Caractérisation du climat par diagramme de Givoni à l'intérieur (capteur 50 bureaux LEU 2)

Ar*Tableau 3 Nombres d'heures au-delà des températures limites (20°C, 28°C, 30°C, 32°C) de la station météo de Terre-Sainte (campus universitaire)*

Nombre d'heures au-delà des températures limites					
-	Occupation	T < 20°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C
-	340 h	0 h	144 h	31 h	4 h
ratio	100%	0%	42%	9%	1%

Tableau 4 Nombres d'heures au-delà des températures limites (capteur 22 coursive)

Nombre d'heures au-delà des températures limites								
-	Occupation	T < 20°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C	T > T ext	T > T ext ; T > 28°C	T > T ext ; T > 30°C
-	340 h	0 h	119 h	26 h	3 h	285 h	97 h	21 h
ratio	100%	0%	35%	8%	1%	84%	28%	6%

Tableau 5 Nombres d'heures au-delà des températures limites (capteur 56 milieu minéral)

Nombre d'heures au-delà des températures limites								
-	Occupation	T < 20°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C	T > T ext	T > T ext ; T > 28°C	T > T ext ; T > 30°C
-	340 h	0 h	147 h	107 h	81 h	250 h	135 h	105 h
ratio	100%	0%	43%	31%	24%	73%	40%	31%

Tableau 6 Nombres d'heures au-delà des températures limites (capteur 57 jardin central)

Nombre d'heures au-delà des températures limites								
-	Occupation	T < 20°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C	T > T ext	T > T ext ; T > 28°C	T > T ext ; T > 30°C
-	340 h	0 h	90 h	22 h	4 h	181 h	62 h	20 h
ratio	100%	0%	26%	6%	1%	53%	18%	6%

Tableau 9 Nombres d'heures au-delà des températures limites (capteur 25 bureaux LAB

Nombre d'heures au-delà des températures limites								
-	Occupation	T < 20°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C	T > T ext	T > T ext ; T > 28°C	T > T ext ; T > 30°C
-	340 h	0 h	103 h	11 h	2 h	248 h	63 h	8 h
ratio	100%	0%	30%	3%	1%	73%	19%	2%

Tableau 8 Nombres d'heures au-delà des températures limites (capteur 50 bureaux LEU 2)

Nombre d'heures au-delà des températures limites								
-	Occupation	T < 20°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C	T > T ext	T > T ext ; T > 28°C	T > T ext ; T > 30°C
-	340 h	0 h	116 h	8 h	2 h	240 h	67 h	5 h
ratio	100%	0%	34%	2%	1%	71%	20%	2%

Tableau 7 Nombres d'heures au-delà des températures limites (capteur 15 varangue urbaine)

Nombre d'heures au-delà des températures limites								
-	Occupation	T < 20°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C	T > T ext	T > T ext ; T > 28°C	T > T ext ; T > 30°C
-	340 h	0 h	93 h	18 h	2 h	224 h	54 h	14 h
ratio	100%	0%	27%	5%	1%	66%	16%	4%

ANNEXE 5 chapitre 3

Evaluation des performances aérauliques de l'Ilet du centre.

Dans cette partie nous allons déterminer comment le confort est atteint en période chaude, c'est-à-dire la proportion du temps ou le confort thermique est atteint par la ventilation naturelle et l'apport des brasseurs d'air. Notre méthode est illustrée ci-après (voir Figure 11).

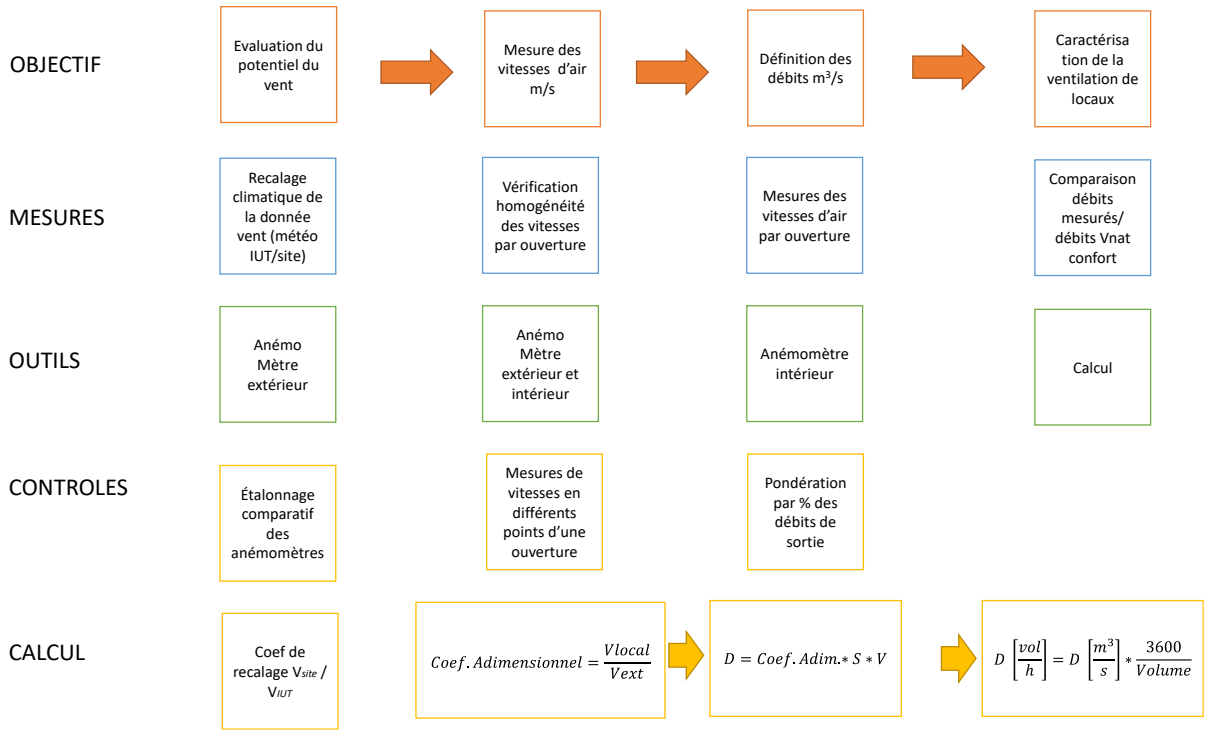


Figure 11 Diagramme méthodologie de caractérisation des performances aérauliques des bureaux

Pour approcher le comportement en ventilation des bureaux, nous avons effectué une campagne de mesure au mois de Juin 2018.

Ces mesures vont permettre de corréler la vitesse du vent local (V_{site}) avec la vitesse dans les locaux (V_{local}) et ainsi évaluer le potentiel de ventilation sur une période estivale et en préciser sa dimension.

En effet, la thèse de Xavier Gillard (Gillard 2008) réalisée sur les bureaux de l'Ilet du Centre concluait :

« thermal comfort within the offices is achievable all the year long, either by natural ventilation (from May to October), or with the help of the ceiling fans ». « Le confort thermique dans les bureaux est atteignable tout au long de l'année, soit par ventilation de confort (de Mai à Octobre) ou avec l'aide des brasseurs d'air ».

C'est ce postulat « d'atteignable » que nous allons tenter de valider ci-après.

Mesure du vent extérieur du site

Afin de comparer en temps réel la vitesse du vent météo et la vitesse de l'air dans les bureaux un anémomètre à coupelle couplé à une girouette ont été mis en place à l'extérieur, pendant le mois de Juin 2018 (27 et 28). Ils ont été positionnés sur la toiture du bâtiment B, au vent de l'opération et en hauteur sur un mat de 5m, lui-même posé sur une terrasse à 8,5m au-dessus du sol (voir Figure 13 et Figure 12). Ce positionnement permet de dégager le système de mesure des effets de sillage, de masque bâti et fiabilise ainsi la mesure.

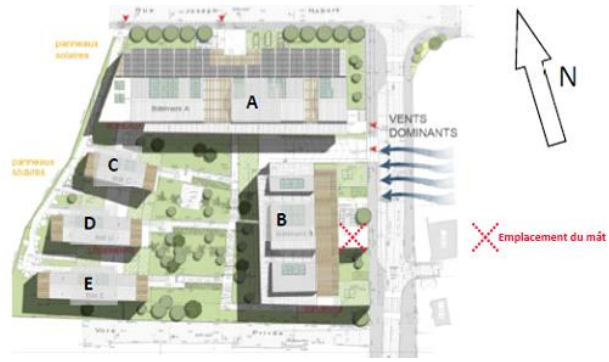


Figure 13 Localisation du mât de mesure

Cette station permettra d'obtenir les vitesses du vent

Figure 14 Anémomètre à coupelle et girouette en extérieur (à gauche), anémomètre à fil chaud en intérieur (à droite)

extérieur (V_{ext}), de traduire nos résultats en coefficient adimensionnel et de préciser la direction du vent.

$$Coef.Adimensionnel = \frac{Vlocal}{Vext}$$

Avec V la vitesse en m/s.

Les instruments de mesure utilisés pour les mesures sont (voir Figure 14):

L'anémomètre à coupelle et la girouette, en extérieur, fournissent des données à un enregistreur qui peut atteindre une portée de 1200 m. Les données sont enregistrées via une clé USB et peuvent être analysées à tout moment.

Pour les mesures intérieures, un anémomètre à fil chaud a été utilisé. Les enregistrements se font grâce à un boîtier directement relié à l'anémomètre.

Comparaison vent site / vent station météo IUT

Nous nous concentrerons ici sur les éléments aérauliques de la station météorologique la plus proche afin de corréler les vitesses et directions du vent, en hiver et en été, entre le site et la station météo (V_{ext} et $V_{météo}$). Nous pourrons ainsi déterminer si les conclusions sur le potentiel de ventilation du bâtiment, sur la période de mesure, sont transposables pour les différentes périodes de l'année.

La station météorologique choisie est celle de l'IUT de Terre Sainte, c'est en effet la plus proche, elle est implantée à l'Est du projet (voir chapitre 2).

Les directions des vents issues de la station météo, donnent des directions de vent venant du Sud-Est durant la journée pour toutes les périodes de l'année. Les vitesses de vents restent approximativement les mêmes pour les différentes périodes.

Le Tableau 10 ci-dessous issu de ces données météo, montre des vitesses de vent moyen entre 2.1 et 3.1 m/s. (voir Tableau 11).

La similitude d'ordre de grandeur et de direction entre les vitesses mesurées sur site sur des journées type (voir Tableau 11) et les vitesses moyenne mensuelle (voir Tableau 10) nous permet d'envisager une répétitivité et représentativité des mesures faites sur 2 jours : mêmes gammes de vitesse de vent et mêmes directions. Il aurait été plus précis d'étendre la période de mesure sur une plus longue période, afin d'identifier une séquence de jours ou le vent est établi et augmenter la fiabilité de ces observations.

Lors de la prise de mesure, nous avons observé une variation de direction du vent très importante pouvant aller jusqu'à $\pm$ 45°. Cette variation entraine ainsi des circulations variables autour et au sein du bâtiment. En effet le vent présente cette caractéristique instationnaire et ce d'autant plus compte tenu du contexte urbain, non dégagé du projet.

Tableau 10 Vitesse de vent moyenne par mois station de l'IUT

Mois	Vitesse de vent moyenne (m/s) $V_{météo}$	Pourcentage de vitesse de vent supérieure à 1,5 m/s
Janvier	2,9	72%
Février	2,8	70%
Mars	2,5	62%
Avril	2,4	63%
Mai	3,1	71%
Juin	2,7	75%
Juillet	2,5	80%
Août	2,8	81%
Septembre	3,0	85%
Octobre	2,8	75%
Novembre	2,1	62%
Décembre	3,0	73%

Tableau 11 Vitesse de vent extérieur mesurées sur site

Vitesse ext. maxi. mesurée m/s,	Vitesse ext. mini. mesuré m /s	Vitesse moy. pondérée mesurée m/s
5,7m/s	V_1 =2,8 m/s	V_2 =4,2m/s

Etalonnage des anémomètres

Une mesure comparative et simultanée des 2 anémomètres nous a montré des différences notables.

Nous avons donc procédé à l'étalonnage de nos deux capteurs avec la soufflerie de l'ESIROI, notre anémomètre à coupelle avait une sous-évaluation en moyenne de 42% avec les valeurs de la soufflerie. L'anémomètre à fil chaud avait un écart de l'ordre de 4%. Ainsi, afin de palier à cette différence de mesure et au regard de l'étalonnage, un coefficient correctif de 1.46 sera appliqué à la mesure du vent site (V_{ext}) avant calcul des coefficients adimensionnels pour chaque fenêtre.

Vérification de l'homogénéité des flux

Avant la réalisation des mesures de vitesse, un test a été réalisé afin de vérifier l'homogénéité du flux sur la hauteur des jalousies. Il a été pris trois points de mesures (Point 1, Point 2 et Point 3) répartis sur toute la hauteur de la jalousie, (voir Figure 15).

Par point de mesure il a été fait trois séquences de mesure de 10mn chacune. Sur chaque séquence de mesure le pas de temps d'acquisition était de 1/3 de seconde. Les coefficients adimensionnels ont été calculés pour chaque séquence et pour chaque point de mesure. Le Tableau 12, récapitule ces résultats.

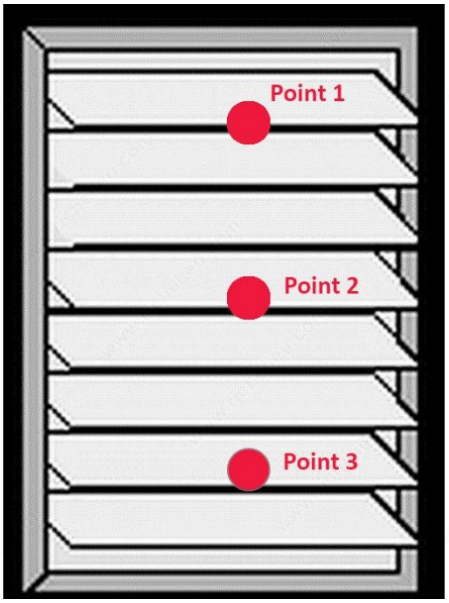


Figure 15 Emplacement des points de mesure sur hauteur de la jalousie

Tableau 12 Résultats du test d'homogénéité sur jalousie

Positions des capteurs	Coef.1 (0-10 min)	Coef.2 (10-20 min)	Coef.3 (20-30 min)
Point 1	0,07	0,07	0,07
Point 2	0,09	0,08	0,08
Point 3	0,07	0,09	0,09

Les coefficients obtenus sont globalement faibles et de l'ordre de 0.10 mais restent homogènes avec une différence de 0.02 entre chaque point et chaque séquence. Nous prendrons donc les mesures au centre de chaque fenêtre, les résultats refléteront bien les vitesses sur l'ensemble de l'ouverture. On pourra donc considérer un point de mesure par jalousie.

Mesure des taux de sortie des baies

Les mesures ont été effectuées sur les baies sous le vent avec l'anémomètre à fil chaud, côté façade en dépression (Façade Nord Nord Est). Les mesures sur les baies au vent (débits entrants) ont montré qu'elles étaient soumises à de fortes fluctuations car soumises à des perturbations extérieures. Elles ne reflétaient pas la ventilation traversante du bâtiment. Les débits sortants sont eux mieux organisés et plus significatifs, ce qui explique le choix de la mesure.

En effet lors de ces mesures, en ayant positionné l'anémomètre sur les fenêtres de la façade Nord-Nord-Est, avec un vent venant du Sud-Est, nous avons constaté, par moment, des entrées d'air sur la façade Nord-Nord-Est et non exclusivement des sorties. Afin de déterminer le taux de sortie et d'entrée d'air, nous avons, sur 10 mn par fenêtre, relevé à l'aide de brins de laine, le pourcentage de temps où l'air entrait ou sortait par la baie.

On trouve les taux de sortie et d'entrée suivant, (voir Tableau 13) :

Les fenêtres sont répertoriées selon la numérotation des figures 24 et 25. Les fenêtres sous le vent ont des taux de sortie d'environ 70% (voir 3). C'est ce pourcentage qui sera utilisé ultérieurement, en pondération, dans la détermination du débit sortant.

Tableau 13 Taux d'entrée par fenêtre (à titre indicatif) et taux de sortie utilisés pour la détermination des coefficients adimensionnels par fenêtre

Réf.	Temps d'entrée (s)	Temps de sortie (s)	Temps total (s)	Temps total (min)	Taux d'entrée	Taux de sortie
F1	158,00	392,00	550,00	9,17	0,29	0,71
F2	179,00	490,00	669,00	11,15	0,27	0,73
F3	198,00	469,00	667,00	11,12	0,30	0,70
F4	188,00	491,00	679,00	11,32	0,28	0,72
F5	145,00	571,00	716,00	11,93	0,20	0,80
F6	72,00	544,00	616,00	10,27	0,12	0,88
F7	87,00	538,00	625,00	10,42	0,14	0,86
F8	193,00	409,00	602,00	10,03	0,32	0,68
F9	188,00	370,00	558,00	9,30	0,34	0,66
F10	174,00	464,00	638,00	10,63	0,27	0,73
F11	98,00	575,00	673,00	11,22	0,15	0,85
F12	126,00	497,00	623,00	10,38	0,20	0,80

Les coefficients adimensionnels (V_{local}/V_{ext}) présentés sur les plans (voir Figure 18 et Figure 19) sont les moyennes des 3 coefficients déterminés pour chaque baie sur chaque séquence de 10mn. Nous retrouvons deux jalousies où les 3 coefficients adimensionnels ont des écarts notables. Ceux-ci peuvent s'expliquer par des perturbations locales autour de l'appareil ou des erreurs de mesure. Pour les autres baies les coefficients restent de même ordre

Comme on le voit sur les Figure 18 et Figure 19, les coefficients adimensionnels résultants sont de l'ordre de 0,1 ce qui est reconnu comme significatif. Il reste à définir les débits potentiels associés à ces coefficients pour caractériser la ventilation des bureaux C'est ce travail que nous allons développer ci-après.

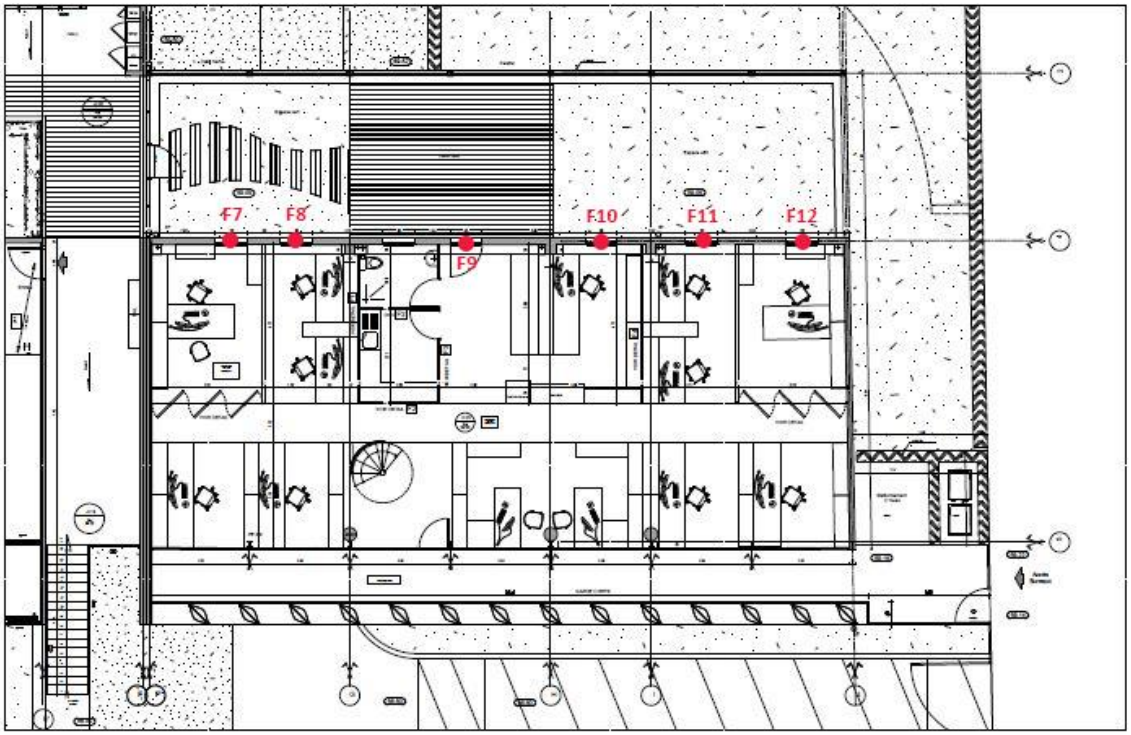


Figure 16 Répartition des jalousies au RDC (© auteur)

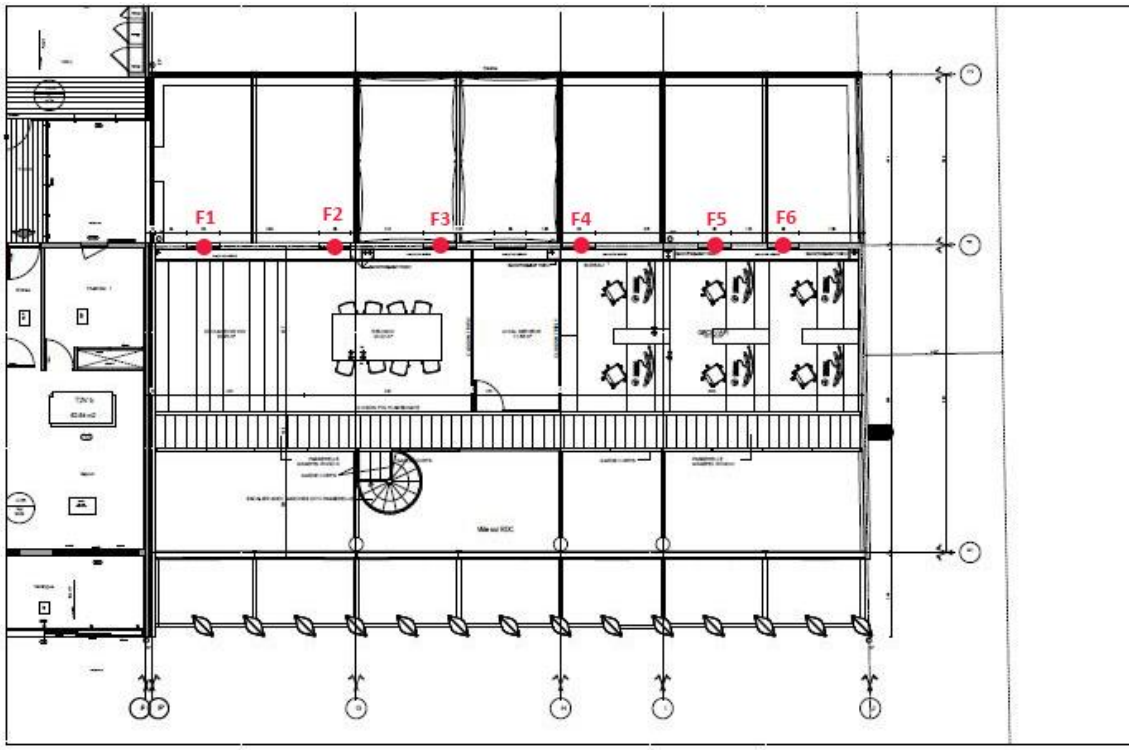


Figure 17 Répartition des jalousies au R+1 (© auteur)

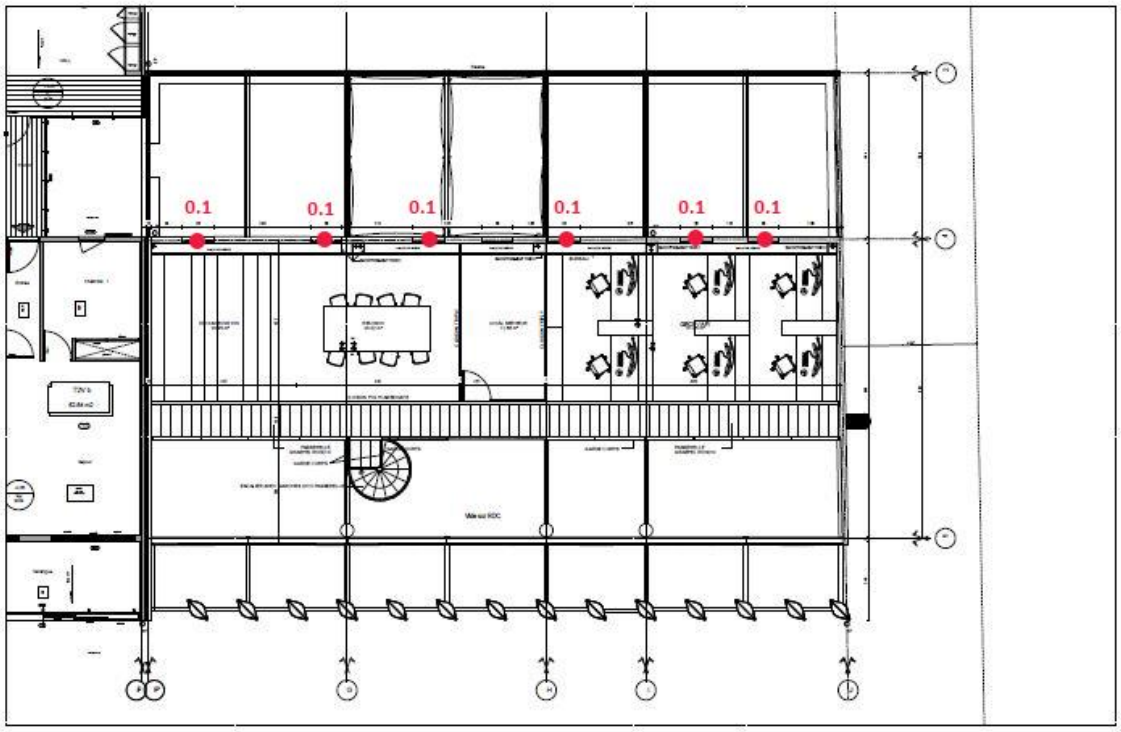


Figure 19 Coefficient Adimensionnel baies R+1 (© auteur)

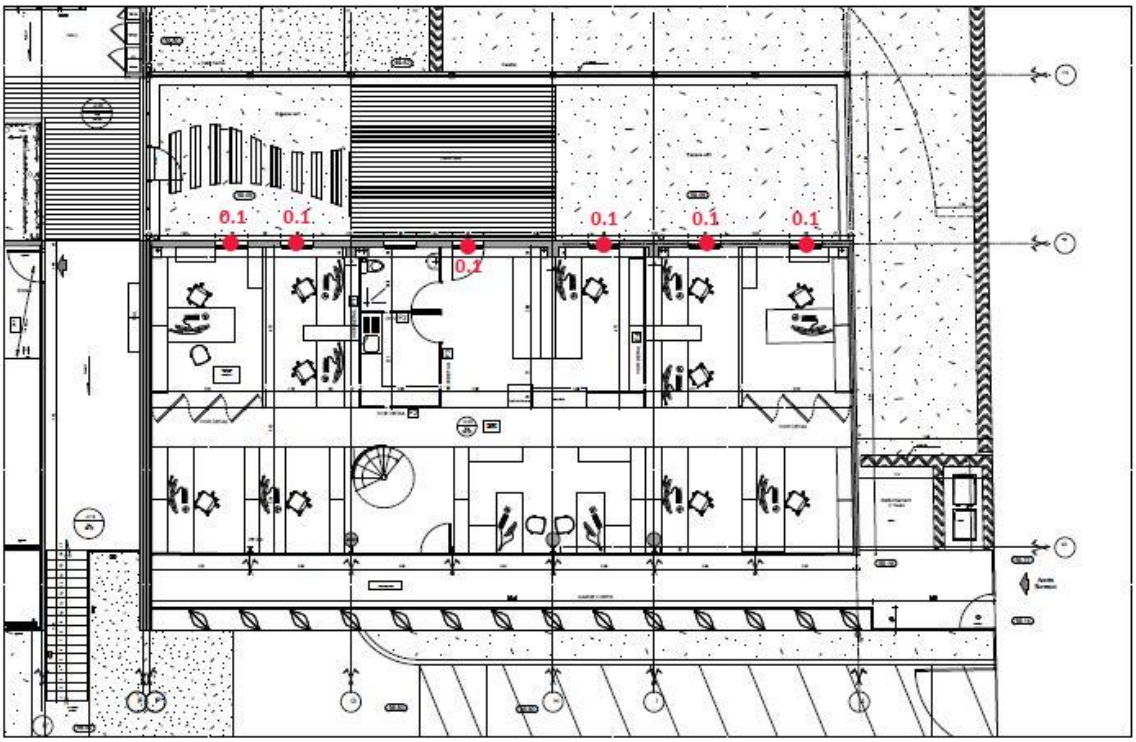


Figure 18 Coefficient Adimensionnel baies RDC (© auteur)

Caractérisation de la ventilation des bureaux

Afin de corréler le confort et les mesures aéraulique, nous nous basons sur les dimensions suivantes (voir introduction) :

- Inconfort : Débit inférieur à 15 vol/h et température supérieure à 28°C ;
- Confort passif : Débit inférieur à 15 vol/h et température inférieure à 28°C ;
- Confort avec brasseurs d'air : Débit supérieur à 15 vol/h et inférieur à 30 vol/h ;
- Confort : Débit supérieure à 30 vol/h.

Pour caractériser le bâtiment avec des vol/h, le débit de sortie doit être déterminé. Pour chaque baie le débit sortant est calculé selon la formule ci-dessous.

$$D = Coef.Adim.* S * V$$

Avec :

- D : Le débit d'extraction total des 13 fenêtres (m^3/s) ;
- Coef. Adim. : Le coefficient adimensionnel moyen de chaque ouverture ;
- S : La surface d'ouverture des 13 baies (m^2) ;
- V : La vitesse de référence (vitesse moyenne V_2 =4,2m/s) ;

Nous nous attacherons plus spécifiquement à la vitesse moyenne plus représentative, elle engendrera une évaluation du débit moyen d'extraction du bâtiment.

Ce débit a été pondéré à 70% compte tenu des observations précédentes.

L'équation de conversion du débit de m^3/s en vol/h est la suivante :

$$D\left[\frac{vol}{h}\right] = D\left[\frac{m^3}{s}\right] * \frac{3600}{Volume}$$

Dans notre cas d'étude, nous déterminons les valeurs de vol/h pour les bureaux. Pour cela, nous avons déterminé leur volume, (voir Tableau 14):

Tableau 14 *Calcul du débit en vol/h dans les bureaux avant pondération à 70% des débits. Avec V_2=4,8m/s (voir* Tableau 11*)*

	Surface bureaux (m^2)	**Hauteur bureaux (m)**	**Volume bureaux (m^3)**	**Débits avec V_2 (m^3/s)**	**Débits Vol/h**
Volume total bureaux	196	5	1024	11,8	41

Le Tableau 14 montre que, pour une vitesse extérieure moyenne V2 = 2.8 m/s, on trouve un débit total de 41 vol/h, soit 28 vol/h après pondération de 70%.

L'ordre de grandeur des débits (qui est ici un traceur du potentiel de confort thermique) permet donc de confirmer que le confort peut bien être atteint par l'action de la ventilation naturelle et des brasseurs d'air.

Toutefois les coefficients adimensionnels ont été calculés aux ouvertures et non sur les postes de travail. Il n'est pas donc possible de déterminer comment le confort sera obtenu sur un

poste de travail (confort ou confort avec brasseurs d'air). Pour cela il aurait été nécessaire de faire en simultané des mesures de vitesse d'air sur les postes de travail (ce qui aurait permis d'évaluer la vitesse d'air sur la peau d'un usager), de température et d'hygrométrie, ce que nous n'avons pas fait et qui permettrait d'affiner ce résultat déjà significatif.

En effet, il permet de conclure que, fenêtres ouvertes, en cas de température extérieure supérieure ou égale à la température intérieure et supérieure à environ 28°C (voir diagramme de Givoni), le confort pourra être atteint grâce à la possibilité, à minima, d'évacuer les surcharges thermiques et l'usage des brasseurs d'air.

ANNEXE 6 chapitre 3

Le comportement hygrothermique de l'ilet du centre

Ce projet de mesure se concentre essentiellement sur les bureaux et a pour objet l'évaluation du confort thermique et d'envisager la validité de la transposition des concepts de l'architecture vernaculaire de ce point de vue. Cet espace bureautique comporte trois entreprises réparties sur deux niveaux avec une mezzanine.

- -LAB Réunion ;
- -LEU Réunion ;
- -LET Réunion.

Celles-ci se partagent un espace de travail ouvert d'une surface de 310 m². Les mesures de température et d'humidité relative qui sont réalisées dans le cadre de ce projet, permettront au travers de l'analyse de diagrammes de Givoni d'évaluer le confort hygrothermique des bureaux et les éventuelles variations selon la position des capteurs. Cette expérience permettra de comparer l'évolution de ces conditions entre les abords et l'intérieur des locaux.

Les méthodes et instrumentations

Pour répondre aux objectifs fixés précédemment, des capteurs de températures et d'humidité ont été placés dans les bureaux et aux abords (voir Tableau 15).

Tableau 15 Inventaire et position des capteurs utilisés.

Nombre de capteurs à l'intérieur	15
Nombre de capteur à l'extérieur	4
Total de capteur	19

Les capteurs positionnés à l'extérieur (rue Joseph Hubert et jardin central) ont été placés dans un abri ventilé. Ceci permet de limiter l'influence du rayonnement solaire. Le capteur positionné au sein de l'espace tampon végétalisé (façade Nord-Est) était protégé par un abri en aluminium. Celui localisé sous la coursive Sud-Ouest ne nécessitait pas de protection spécifique.

Description du projet et instrumentations

Comme il a été dit auparavant, 19 capteurs ont été mis en place positionnés selon les plans ci-après (voir Figure 20 et Figure 21) :

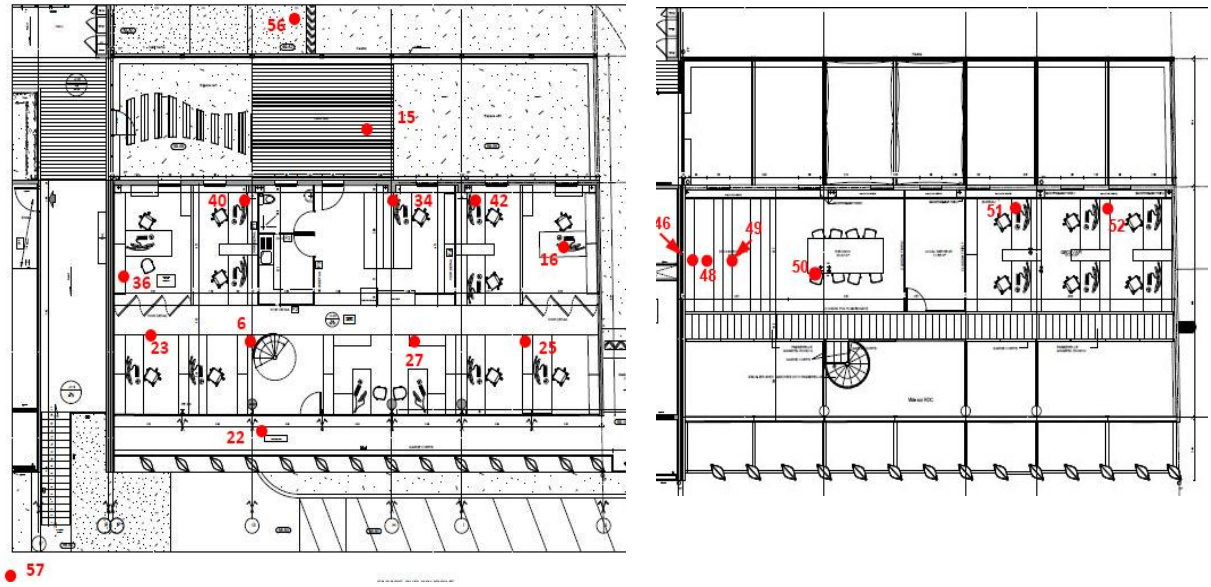


Figure 20 Emplacement des capteurs au RDC et R+1 – Ilet du Centre (© auteur)

Figure 21 Emplacement des capteurs en coupe – Ilet du Centre (© auteur)

Pour cette instrumentation nous avons utilisé des capteurs de température et humidité relative type Testo 174 H, ils ont été suspendus à 2,10m de hauteur.

Les données météo

Figure 22 Localisation de la station météo de référence par rapport à l'Ilet du Centre (carte © IGN)

Cette étude a été réalisée au mois de mars 2108. La représentativité de ce mois comme mois le plus chaud de l'année est visible sur les données de la station météorologique de Terre Sainte, la plus proche du site (voir Figure 22).

On constate une équivalence des températures moyennes maximale et minimale pour les mois de Décembre à mars et une hygrométrie dans la moyenne des mois chauds.

Ces données sont récapitulées dans le Tableau 16 ci-dessous. On y note 31h avec des températures supérieures à 30°C et 4h mesurées avec des températures supérieures à 32°C générant un risque d'inconfort sans vitesse d'air.

C'est ce tableau qui nous servira de base de comparaison avec les mesures aux différents points (voir Tableau 16) pour le capteur 25, voir annexe 4.

Confort des différentes zones de mesure :

Les mesures de 6 capteurs « type » sont reportées en annexe 4: dans le jardin central, sous la coursive, au RDC des bureaux, à l'étage, sous la varangue urbaine et dans l'espace minéral de l'autre côté de la rue. La Figure 24 illustre le diagramme de Givoni établi à partir des mesures dans les bureaux de LAB RDC. Par comparaison la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre le diagramme établi dans le milieu minéral de l'autre côté de la rue.

Capteur 25 bureaux LAB RDC

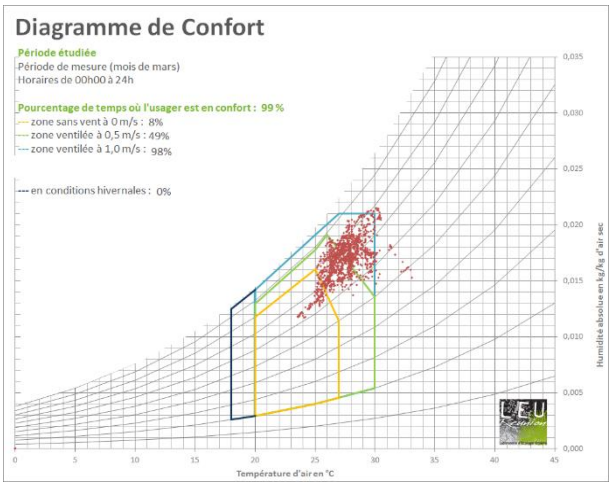
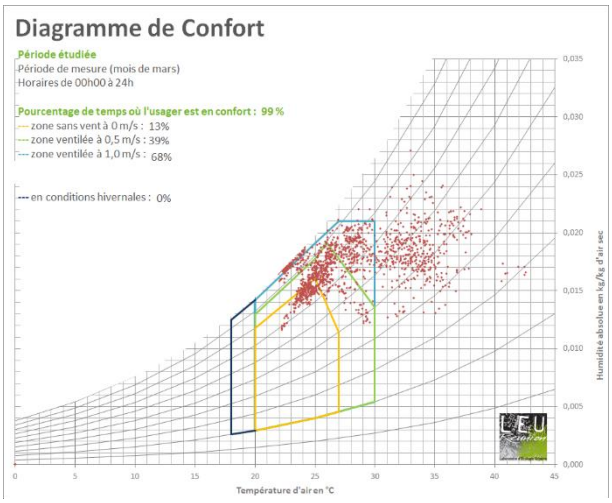
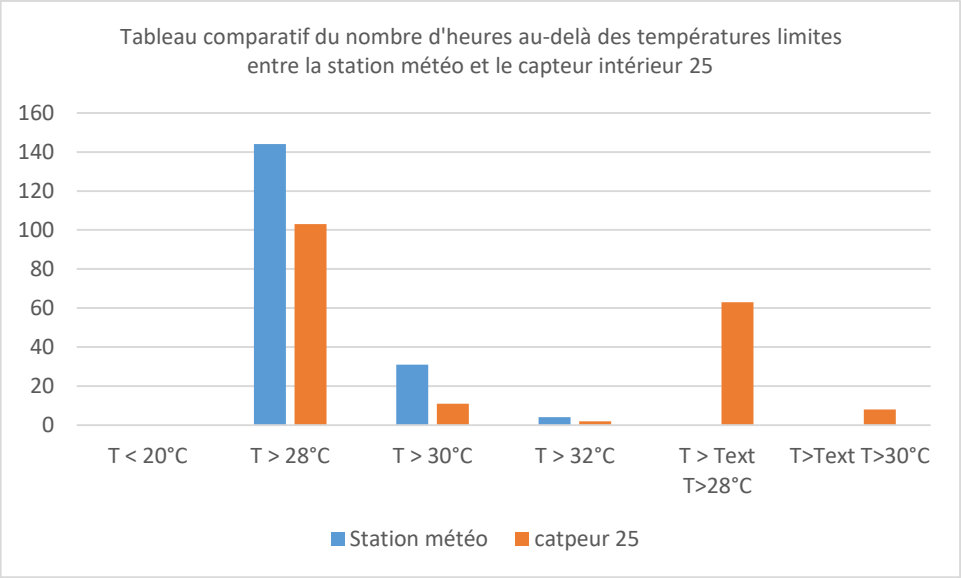


Figure 23 Caractérisation du climat par diagramme de Givoni à l'intérieur (capteur 25 bureaux LAB 1)



Caractérisation du climat par diagramme de Givoni à l'extérieur (capteur 56 milieu minéral)

Tableau 16 Nombre d'heures au-delà des températures limites entre la station météo et la capteur intérieur 25



Conclusion

Le diagramme de confort des bureaux du capteur type 25 (Voir Figure 24) montre que le confort est assuré au sein des bureaux.

Les températures intérieures restent en moyenne inférieures à la température extérieure (voir Tableau 16), ce qui illustre la **validité de l'approche initiale qui permet de limiter l'élévation de température interne en limitant les apports externes, en contrôlant les apports internes et en les évacuant efficacement.**

Enfin, globalement, l'intérieur est en situation de confort entre 95% à 99% du temps. L'inconfort principal est généré par le rayonnement du pignon dont la protection solaire est imparfaite (bardage ventilé avec une lame d'air de 3cm, voir annexe 4).

Afin de mieux approcher le comportement des différents espaces nous allons comparer leur comportement thermique sur plusieurs journées type.

Analyse comparative des températures en différents points sur une journée

Nous allons comparer les températures maximales atteintes dans chaque environnement sous différentes conditions météorologiques pour une journée type. Les données de la station du campus de Terre-Sainte ont été prises comme référence pour le choix. La Figure 25 explicite la répartition des journées étudiées :

La journée pluvieuse présentait une température maximale de 26°C, la journée avec passage nuageux 29°C et la journée la plus ensoleillée 35°C. La température d'une séquence de jours chauds (18 au 20 mars) a également été étudiée.

L'étude de ces journées types, permet une analyse comparative simultanée des températures en différents points, dans différentes conditions climatiques.

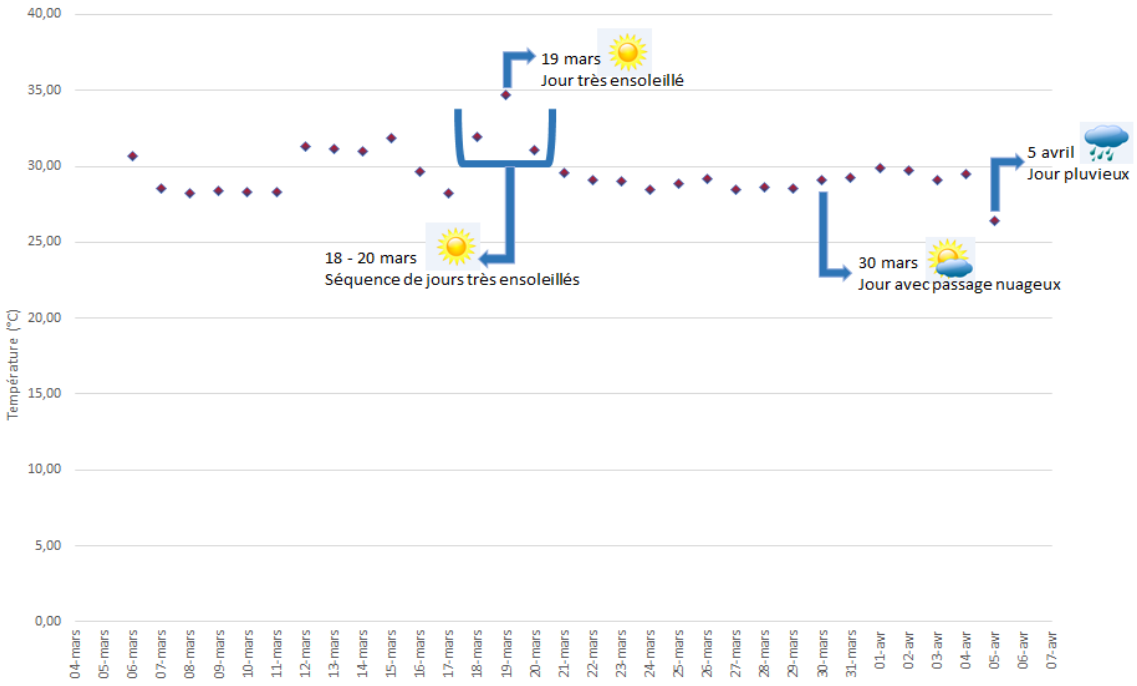
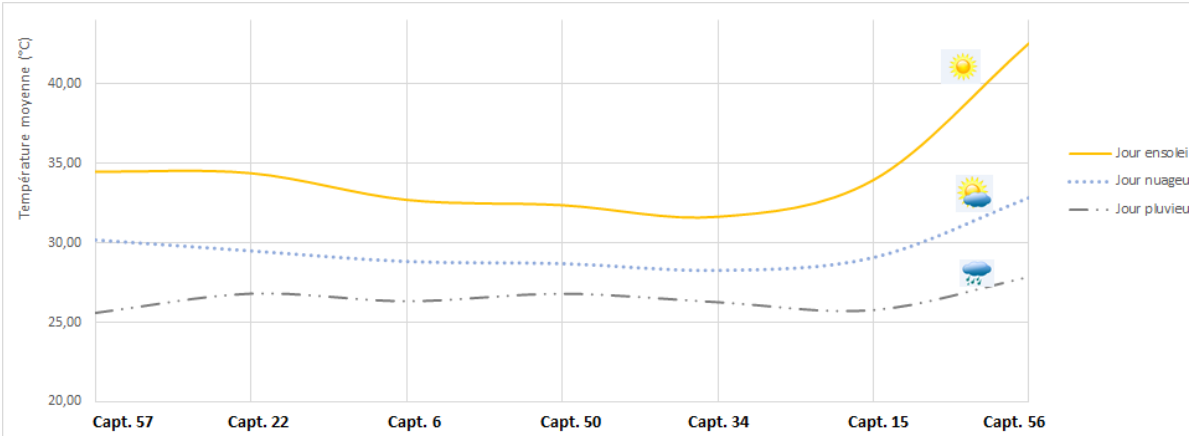


Figure 24 Graphique de répartition des jours étudiés et des températures maximales atteintes



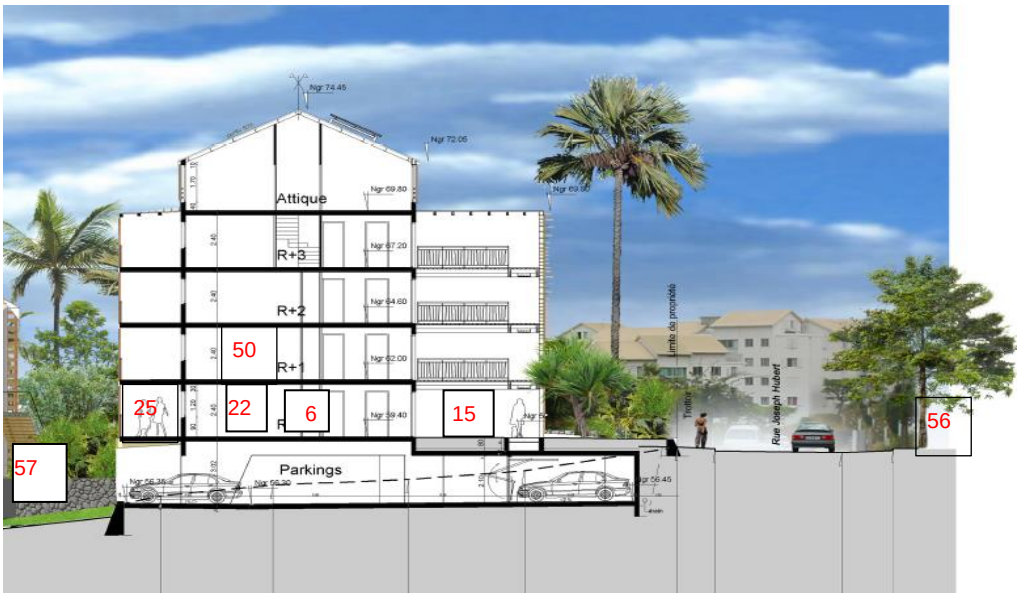


Figure 25 Courbe d'évolution des températures en simultanée en différents points et sur trois jours, ensoleillé, nuageux et pluvieux (courbe et localisation des points de mesure) (© auteur)

La Figure 26 nous permet d'observer les variations de températures simultanément en différents points de mesure.

Comparaison entre points extérieurs

Capteurs 56/57 :

Plus la température est élevée, plus la différence entre ces points est grande :

2° le jour pluvieux, 3°le jour couvert et 8°le jour ensoleillé. Cette mesure met en évidence le rôle du végétal et l'impact de l'albédo des espaces minéralisés. Cette comparaison a fait l'objet d'une étude plus fine ci-après (voir Figure 27). Il convient toutefois de considérer la différence de 8°C entre intérieur et extérieur avec précaution, compte tenu de la possible altération de la mesure extérieure par du rayonnement sur le capteur. Celui-ci était en effet sous abri et

protégé par une enveloppe réfléchissante (aluminium) mais non ventilé. On retiendra donc plutôt l'ordre de grandeur que la mesure précise. Il en sera de même pour les autres comparaisons avec ces capteurs extérieurs.

Comparaison entre points intérieurs

Capteurs 6/34 :

Plus la journée est chaude, plus la différence de température entre les capteurs 6 et 34 est importante. Cela conforte l'observation précédente sur le rôle du végétal et de son pouvoir rafraichissant, le capteur 34 étant le point le plus proche de la varangue urbaine.

Capteurs 6/50 :

Lorsque la température est basse la différence de température s'inverse et le capteur 50 devient supérieur au capteur 6. Dans ce cas le comportement des usagers (les fenêtres sont fermées du fait de l'inconfort du au vent) impacte directement sur les températures. L'absence de ventilation naturelle et/ou de brasseurs supprime la dé stratification et/ou le renouvellement d'air et génère naturellement une température plus élevée à l'étage par convection thermique.

Comparaison entre intérieur et extérieur

Capteurs 22/15 :

La température sous abri avec environnement végétal (capteur 15) est toujours légèrement inférieure à celle du capteur 22, malgré la plus forte exposition de cette zone au Nord Nord Est. Cela illustre le rôle du végétal et de son évapotranspiration dans l'abaissement de la température.

Pour tous les capteurs :

Pour le jour ensoleillé et le jour nuageux, la température intérieure est toujours inférieure à la température extérieure et diminue progressivement de l'extérieur vers l'intérieur. L'efficacité des espaces tampon est ici démontrée que ce soit au Sud Sud Ouest ou au Nord Nord Est.

Pour le jour pluvieux (et le plus froid) cette tendance s'inverse et la température intérieure devient supérieure à la température extérieure, tout en restant dans des températures inférieures à 28° (26° à 27°) et inférieure à l'espace minéralisé.

Ceci illustre l'efficacité du concept du bâtiment et de l'action combinée de la ventilation, de la protection solaire, de l'enveloppe et du végétal. Dès que la ventilation naturelle n'est plus nécessaire au confort, les fenêtres sont fermées par les usagers et on revient à une configuration de fonctionnement d'un bâtiment n'évacuant plus les apports intérieurs et dont la température intérieure dépasse alors la température extérieure.

Comparaison entre les milieux végétalisés et minéralisés

Cette étude se concentre sur la comparaison du milieu minéralisé et du milieu végétalisé, pendant la journée chaude du 19 mars (voir Figure 27) :

La figure 27 met en évidence une différence de température maximale vers le milieu de la journée, entre le jardin central et le milieu minéral. Par ailleurs cette différence avec l'intérieur va même jusqu'à environ **10°C** ce qui est considérable entre le milieu extérieur et la moyenne

des températures intérieures. Cette mesure indique un ordre de grandeur qu'il convient de considérer avec prudence quant au chiffre compte tenu du risque d'interférence du rayonnement sur le capteur extérieur malgré les précautions prises (protection solaire mais absence de ventilation du système).

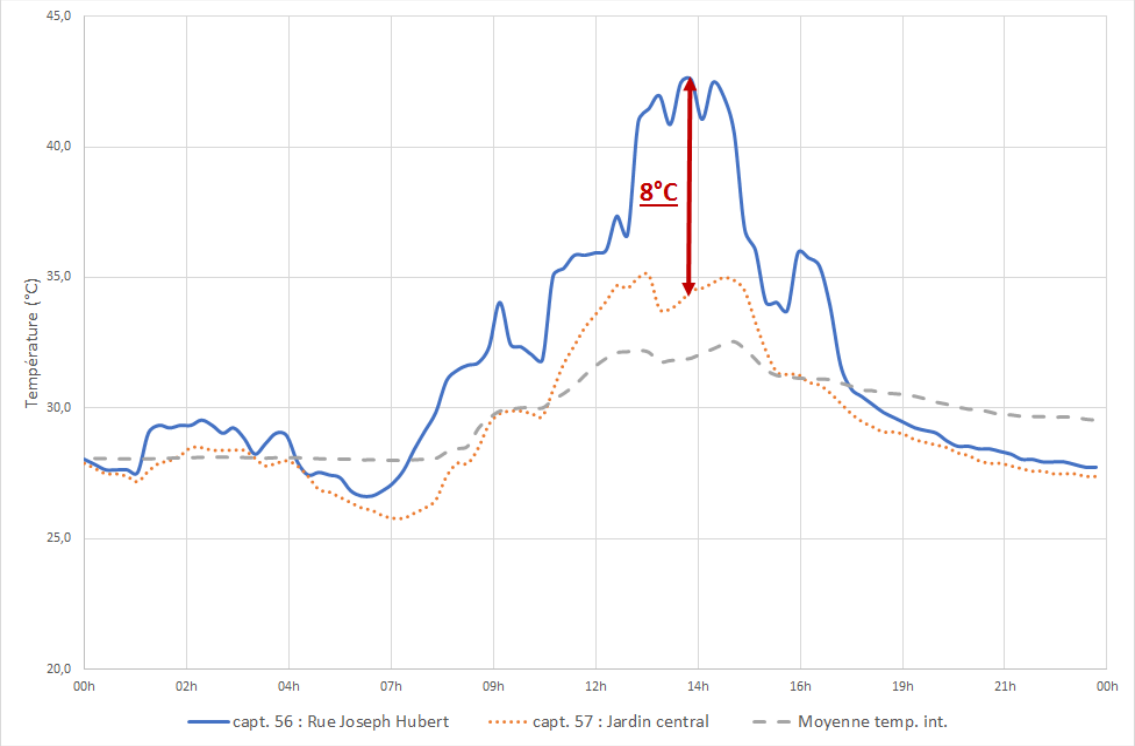


Figure 26 Graphique d'évolution comparée des températures le 19 mars entre le milieu minéralisé, le milieu végétalisé et les températures moyennes intérieures.

On peut aussi constater l'effet inertiel du bâtiment avec des extrémums de température intérieure moins marqués et une température intérieure qui devient supérieure à l'extérieure en début de nuit, suite à la plus rapide chute des températures extérieures.

La température du jardin central reste quant à elle toujours inférieure à celle du milieu minéral ;

Le rôle essentiel du végétal aux abords d'un bâtiment en milieu tropical est ici confirmé pour ce cas d'étude, on retrouve des résultats comparables sur la séquence de jours chaud (voir Figure 28).

Séquences des jours chauds

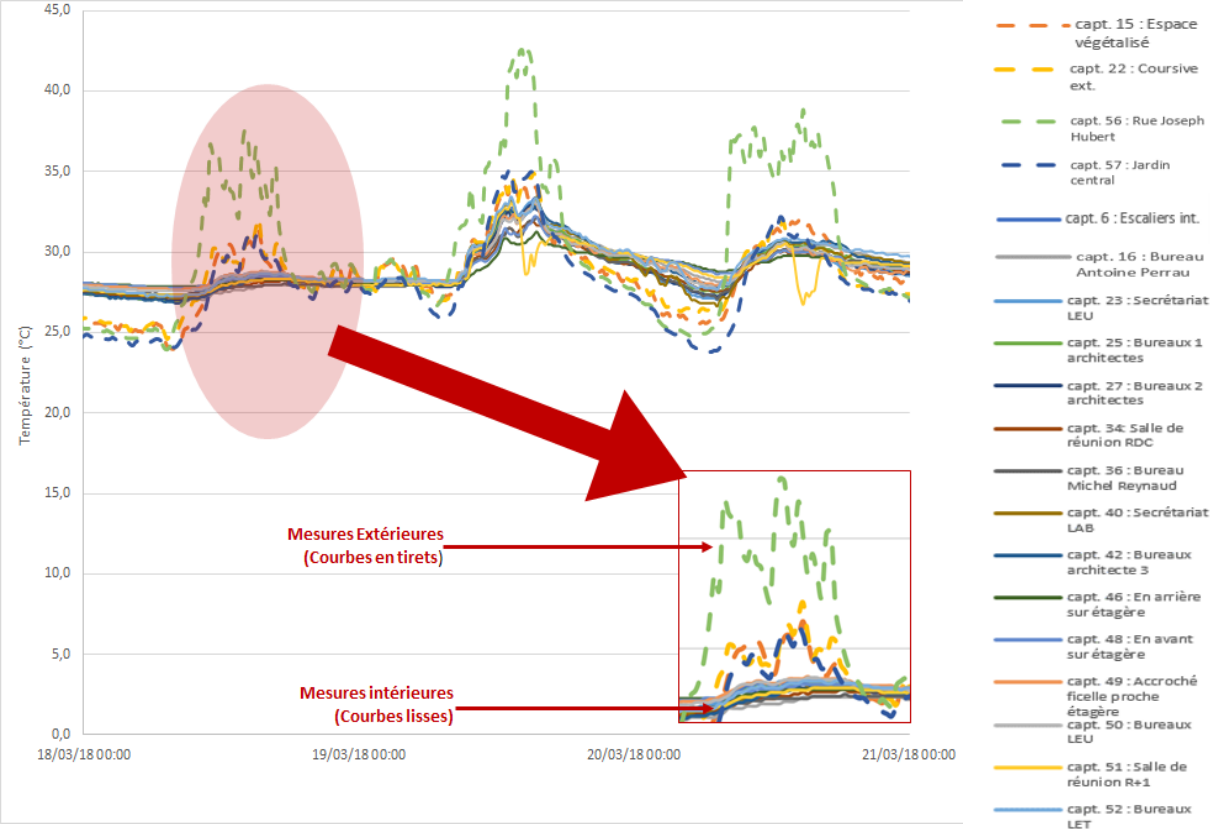


Figure 27 Graphique d'évolution des températures lors de la séquence des jours les plus chauds (18, 19 et 20 mars).

Conclusion sur la comparaison des températures en différents points sur une journée

L'analyse des variations de températures, en différents points, sur une journée (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), met en évidence l'importance de l'environnement et de ses caractéristiques.

Le rôle fondamental, dans l'obtention du confort, des espaces tampons, du végétal et de la ventilation apparait clairement sans toutefois pouvoir évaluer leur impact respectif.

Ce bâtiment répond aux attentes d'un bâtiment bioclimatique. En effet, il permet un confort thermique aux usagers dans différentes situations climatiques (températures chaudes ou fraiches) sans utilisation de la climatisation et grâce à des systèmes passifs, non énergivoires.

Comparaison du comportement thermique entre la maison Levieux et l'Ilet du Centre

Au-delà des constats précédents la comparaison entre un logement traditionnel et un logement actuel reste à faire. Les mesures des chapitres 2 et 3 vont nous permettre cette approche.

Nous allons comparer le comportement d'une pièce ouverte et donc correctement ventilée de la maison LEVIEUX (le salon), (voir chapitre 2) et des bureaux de l'Ilet du Centre, lors de la journée la plus chaude de la campagne de mesure faite pour les deux bâtiments, le 19 Mars 2018.

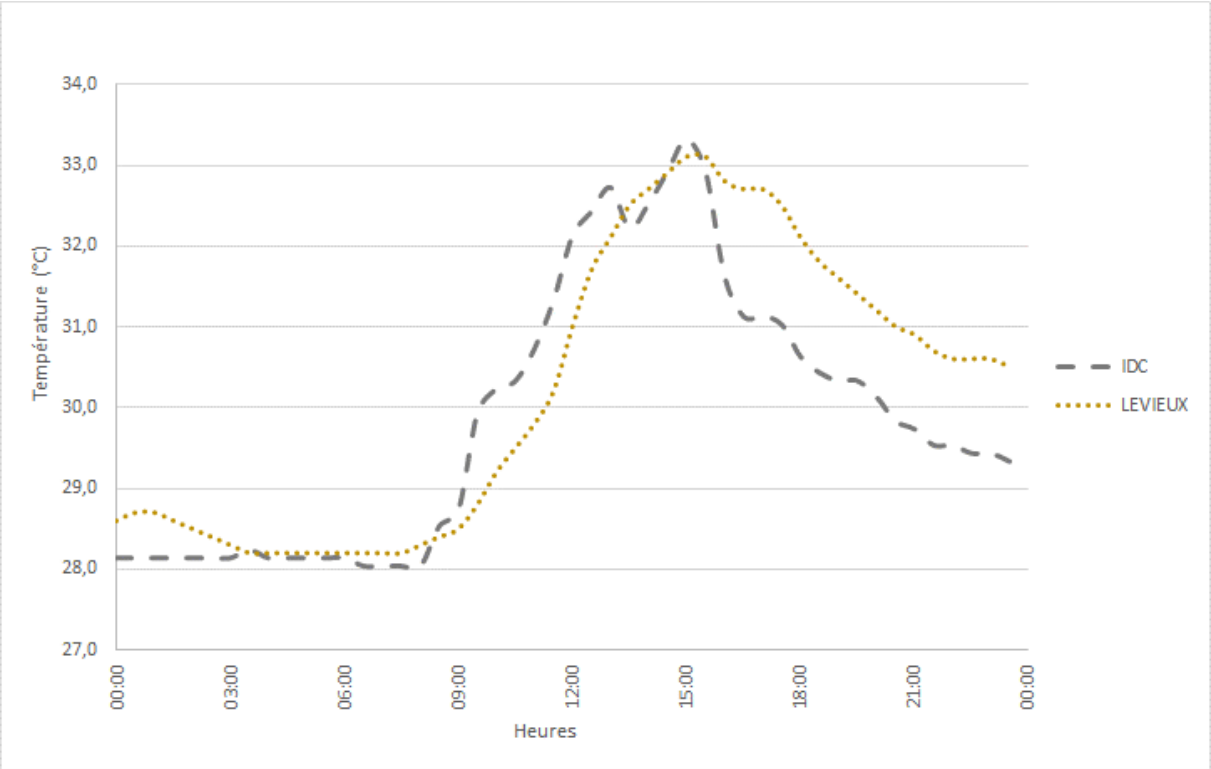


Figure 28 Courbes de comparaison de l'évolution des températures entre la maison Levieux et l'Ilet du Centre sur une même journée

La Figure 34 montre des températures maximales atteintes autour de 15h dans les deux cas. Cependant, la montée en charge pour la maison LEVIEUX se fait en léger décalage de l'Ilet du Centre, il en est de même pour la décharge du bâtiment. Ces décalages peuvent se justifier par une inertie et/ou une protection solaire différentiée des deux bâtiments. En effet les bureaux sont bien protégés par les brise-soleils en façade Nord-Nord-Ouest là où la maison est sous une toiture non isolée et plus exposée à l'Ouest avec un comble non ventilé.

Malgré ces différences entre les courbes, nous pouvons observer une certaine similitude avec une augmentation des charges durant la matinée et une décharge durant l'après-midi. Cette augmentation des charges est due aux rayonnements solaires ainsi qu'aux activités des usagers. Les gammes de températures mesurées sont proches. Le confort mesuré est de 99% pour les bureaux et 97% pour la maison avec une vitesse d'air de 1m/s.

Cette proximité montre un comportement comparable des deux bâtiments. Ils fonctionnent tous deux en ventilation naturelle traversante, avec des espaces tampons et une végétation

aux abords permettant la protection des façades et la diminution de la température de l'air avant son insertion au sein du bâtiment. Les différences de comportement thermique relevant des différences de protection et d'isolation. La transposition des concepts architecturaux et paysagers traditionnels d'une maison individuelle à du logement collectif permet de conserver des caractéristiques de confort comparable, malgré le changement d'échelle.

Il reste à déterminer plus précisément comment ce confort est atteint, en particulier la part de ventilation naturelle de confort et celle obtenue par l'usage des brasseurs d'air, ce qui pourrait faire l'objet d'un prolongement de cette étude.

ANNEXE 7 chapitre 3

Les enquêtes de confort de l'ilet du centre

Au-delà de ces mesures physiques et de leurs conclusions, il est intéressant de croiser ces résultats avec le ressenti des utilisateurs. Il n'est en effet pas rare de constater des distorsions entre la réalité physique mesurée et la réalité ressentie par l'homme, qui est, faut-il le rappeler, au final est primordial.

La méthode d'enquête

Pour la réalisation de ces enquêtes, nous avons adapté la méthode Probe développée par l'université de Wellington. Il en a résulté un questionnaire d'évaluation qui a été distribué aux habitants des logements et aux utilisateurs des bureaux.

Ce questionnaire a été réalisé après une année entière d'utilisation, recouvrant une période chaude et froide complète. (Voir ci-dessous)

Questionnaire d'évaluation de bâtiments

Immeuble d'habitation

Ce sondage est mené dans le but d'améliorer la conception de futurs logements et espaces d'habitations. Les informations recueillies sont considérées comme confidentielles par l'équipe en charge de l'enquête.
Le questionnaire concerne ce bâtiment en général et votre logement en particulier. Répondez SVP au plus grand nombre de questions.

Merci de nous accorder de votre temps.

Exemple d'échelle de valeur :

1/Très insatisfaisant	2/Plutôt insatisfaisant	3/Sans avis	4/Plutôt satisfaisant	5/Très satisfaisant

Numéro bâtiment ….
Numéro appartement ….

Votre point de vue sur l'ensemble du *bâtiment*

(Veuillez cocher une case pour chacune des échelles suivantes)

Que pensez-vous de la conception du bâtiment dans son ensemble ?

1 2 3 4 5
Insatisfaisant ☐☐☐☐☐ Satisfaisant

Commentaires
……
……
……

Les espaces communs correspondent-ils à vos besoins ?

Insatisfaisant ☐☐☐☐☐ Satisfaisant

Commentaires
……
……
……..

Etes-vous satisfait de la gestion des parties et équipements communs (jardins, espaces dessertes…) ?

Insatisfaisant ☐☐☐☐☐ Satisfaisant

Quel est, à votre avis, l'image que le bâtiment pris dans son ensemble donne aux visiteurs ?

Bonne ☐☐☐☐☐ Mauvaise

L'environnement de votre logement vous parait-il sécurisant ?

Sécurisant ☐☐☐☐☐ Dangereux

Que pensez-vous de l'état global de propreté du bâtiment ?

Satisfaisant ☐☐☐☐☐ Insatisfaisant

Globalement, trouvez-vous votre immeuble agréable à vivre ?

Insatisfaisant ☐☐☐☐☐ Satisfaisant

Entretenez vous des relations de voisinages :
- ☐ amicale
- ☐ conflictuelle
- ☐ pas de contact

Commentaires
……
……
……

Votre point de vue sur l'ensemble de votre *logement*

(Veuillez cocher une case pour chacune des échelles suivantes)

Que pensez-vous de votre appartement dans son ensemble ?

Insatisfaisant ☐☐☐☐☐ Satisfaisant

L'espace dont vous disposez est-il adapté à vos besoins ?

Insatisfaisant ☐☐☐☐☐ Satisfaisant

Commentaires
……
……
……..

Les capacités de rangement sont-elles appropriées ?

Insatisfaisant ☐☐☐☐☐ Satisfaisant

Confort

Veuillez décrire ce que vous ressentez dans votre logement en hiver, puis en été. Si vous n'occupiez pas ce domicile durant l'une des saisons, merci de ne pas répondre aux questions correspondantes.

La température en hiver

Inconfortable ☐☐☐☐☐ Confortable
Trop chaud ☐☐☐☐☐ Trop froid
Stable ☐☐☐☐☐ Variable

L'air en hiver

Calme ☐☐☐☐☐ Courant d'air
Sec ☐☐☐☐☐ Humide
Frais ☐☐☐☐☐ Pollué
Inodore ☐☐☐☐☐ Odorant

Les conditions globales en hiver

Insatisfaisantes ☐☐☐☐☐ Satisfaisantes

La température en été

Inconfortable ☐☐☐☐☐ Confortable
Trop chaud ☐☐☐☐☐ Trop froid
Stable ☐☐☐☐☐ Variable

L'air en été

Calme ☐☐☐☐☐ Courant d'air
Sec ☐☐☐☐☐ Humide
Frais ☐☐☐☐☐ Pollué
Inodore ☐☐☐☐☐ Odorant

Les conditions globales en été

Insatisfaisantes ☐☐☐☐☐ Satisfaisantes

Bruit

Le bruit en général :

Insatisfaisant ☐☐☐☐☐ Satisfaisant

Le bruit à l'intérieur de votre logement (résonance) ?

Faible ☐☐☐☐☐ Fort

Le bruit causé par vos voisins (appartement adjacent)

Faible ☐☐☐☐☐ Fort

Le bruit venant de l'extérieur

Faible ☐☐☐☐☐ Fort

Commentaires
……
……
……

Eclairage

L'éclairage en général :

Insatisfaisant ☐☐☐☐☐ Satisfaisant

La lumière naturelle :

Faible ☐☐☐☐☐ Forte

L'éclairage artificiel :

Faible ☐☐☐☐☐ Fort

Commentaires
……
……
……..

Généralement, lorsque vous êtes dans votre logement, comment vous sentez- vous ?

Bien ☐☐☐☐☐ Maladif

Quel(s) avantage(s) ce logement vous offre-t-il, qui n'existait pas dans votre (vos) précédent(s) logement(s) ?
……
……
……..

Quel(s) aspect(s) de votre (vos) précédent(s) logement(s) regrettez-vous ?
……
……
……..

Information générale

Aspect environnemental

Avez-vous été informé des dispositions prises relatives :
A la climatisation des logements ?
- ☐ Oui
- ☐ Non

Au traitement des déchets ?
- ☐ Oui
- ☐ Non

Au jardin et à son entretien ?
- ☐ Oui
- ☐ Non

Considérez-vous que ce jardin ait un caractère « exceptionnel » par à rapport à ceux qui existent dans d'autres résidences ? Expliquez
……
……
……..

Pensez-vous que votre logement soit moins confortable du fait de l'absence de climatisation électrique ?
- ☐ Oui
- ☐ Non

Triez-vous vos déchets…
Poubelle jaune ?
- ☐ Oui
- ☐ Non

Compost ?
- ☐ Oui
- ☐ Non

Pour quelle(s) raison(s) utilisez (ou n'utilisez)-vous pas les composteurs mis à votre disposition ?
……
……
……

Quel est votre âge ?
- ☐ Moins de 25 ans
- ☐ Entre 25 et 60 ans
- ☐ Plus de 60 ans

Et votre sexe ?
- ☐ Masculin
- ☐ féminin

Etes-vous locataire ou propriétaire ?
- ☐ Locataire
- ☐ Propriétaire
- ☐ Résident à titre gratuit

Quels sont les raisons principales qui vous ont poussé à choisir cet appartement ?
- ☐ Proximité membre de la famille
- ☐ Proche du lieu de travail
- ☐ Proximité commerces, services publics
- ☐ Proximité équipements d'accueil des enfants
- ☐ Superficie
- ☐ Coût
- ☐ Image du bâtiment
- ☐ Conception bioclimatique des bâtiments
- ☐ Autres (précisez)

Commentaires
……
……

Depuis combien de temps y habitez-vous ?
- ☐ Moins de 6 mois,
- ☐ Moins d'un an

Combien de pièces compte-t-il (ne pas inclure les sanitaires et la cuisine)?

☐ 1	☐ 1 terrasse
☐ 2	☐ 2 terrasses
☐ 3	☐ plus de 2 terrasses
☐ Plus de 3	☐ Jardinet(s)

Combien d'adultes vivent dans ce logement ? ….
Et d'enfants ?...

Déplacements
De combien de voitures dispose votre foyer ? ……
Possédez-vous une place de parking personnelle ?
- ☐ Oui
- ☐ Non

Si vous possédez un box-parking, comment l'utilisez-vous ?
…… ……
……

Possédez-vous un vélo ?
- ☐ Oui
- ☐ Non

Si oui, l'utilisez-vous comme :
- ☐ Un moyen de transport
- ☐ Un outil de loisirs
- ☐ Ne l'utilise pas

Ou le rangez-vous ?
……
……

Si non, pourquoi ?
……
……
……

Préférez-vous utiliser :
- ☐ L'ascenseur
- ☐ Les escaliers

Nous vous remercions pour votre aide

Si vous avez des commentaires supplémentaires sur les sujets évoqués, sentez-vous libre de les écrire sur cette page.

Information :
Pour toute information complémentaire, veuillez contacter Mme Séphorah Lechat
Courriel : sephorahlechat@gmail.com

Autres commentaires :

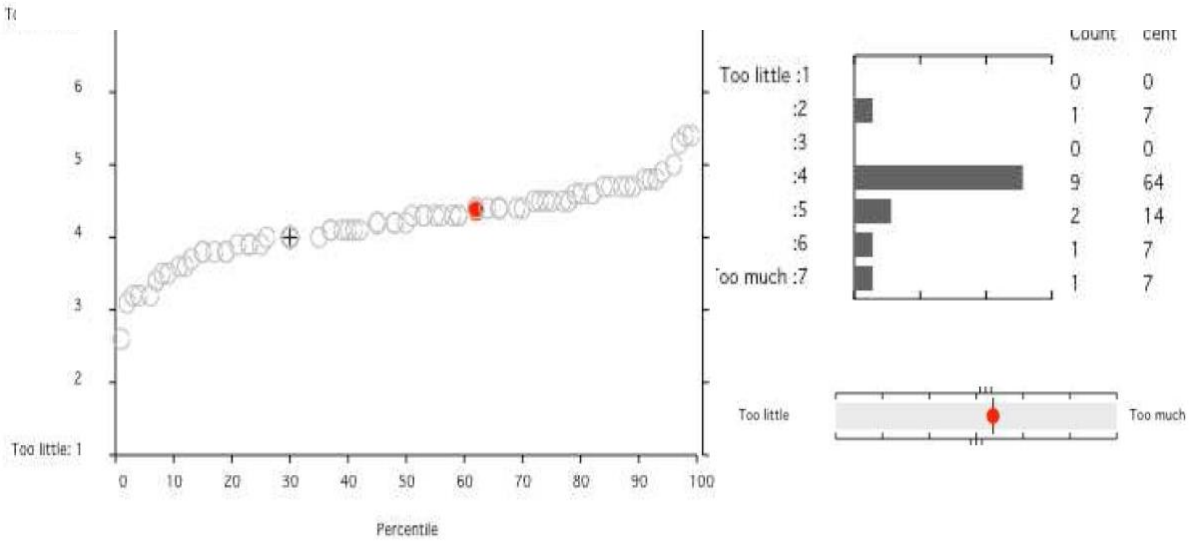
2APMR (Atelier Architecture et de Paysage Michel Reynaud)
APA (Antoine Perrau Architectures)
LEU (Laboratoire d'Ecologie Urbaine)

3

Ci-dessous le graphique final (voir Tableau 18) établi pour l'évaluation du confort des bureaux par 14 utilisateurs.

Résultats

Tableau 17 Graphiques de résultats de l'enquête de confort pour les bureaux



Il en résulte que 64% des utilisateurs évaluent qu'il ne fait globalement ni trop chaud, ni trop froid en saison chaude dans les bureaux.

Au-delà des résultats bruts, l’analyse plus fine apporte des éclairements sur certains éléments ayant généré de l’inconfort.

ANNEXE 8 chapitre 3

Rapport 15- 104 VN V1 Aérodynamique Eiffel collège Bouéni

Nombre de pages : 58

ADEME-MAYOTTE

Analyse aérodynamique en ventilation naturelle
D'un bâtiment d'enseignement
Application au cas type du collège Bouéni à Mayotte

Programme PREBAT – Démarche MAYENERGIE PLUS pour Mayotte

Cette étude a été réalisée conformément à
notre devis n° 14-41 En du 31 octobre 2014

Paris, le 20 avril 2015

Benoît BLANCHARD

Gérant

67, rue Boileau

75016 PARIS

Tél. : (33) 01.42.88.47.40

Fax : (33) 01.42.88.35.39

Visioconférence : (33) 01.45.24.72.02

http://www.aerodynamiqueeiffel.fr

ANNEXE : SYNTHESE AERODYNAMIQUE DE JACQUES GANDEMER ……39 290

1. INTRODUCTION 291

1.1 PREAMBULE 291

1.2 OBJECTIF 291

1.3 LE SUPPORT DE L'ETUDE 291

2. LOCALISATION DU SITE 293

3. METHODES EXPERIMENTALES 295

3.1 LA SOUFFLERIE 295

3.1.1 CARATERISTIQUES DU VENT ET SIMULATION EN SOUFFLERIE 295

3.2 L' INSTRUMENTATION 299

3.3 LA MAQUETTE 299

4. APPROCHE THEORIQUE DE LA PROBLEMATIQUE : VENTILATION NATURELLE 306

4.1 LE PARAMETRE DE LA GENE 306

4.2 RECALAGE DES VITESSES DE VENT PAR RAPPORT A LA REFERENCE DE LA STATION METEOROLOGIQUE ET COEFFICIENT LOCAL 307

4.3 CONDITION D'UNE BONNE IRRIGATION 311

5. IMPLANTATION DES POINTS DE MESURE 312

6. RESULTATS DES ESSAIS 318

6.1 Bâtiment Restauration 318

6.2 Bâtiment F – Salles de cours 319

6.3 Bâtiment F – Salles de cours 319

7. CONCLUSION 322

ANNEXE : SYNTHESE AERODYNAMIQUE DE JACQUES GANDEMER ……39

INTRODUCTION

PREAMBULE

L'ADEME Mayotte a mis en place un programme local « PREBAT - Démarche MAYENERGIE PLUS pour Mayotte» visant à réaliser des bâtiments à faible consommation énergétique. A Mayotte, l'objectif principal est de réduire la consommation énergétique de la climatisation en réduisant son usage ou en évitant de l'installer.

Pour cela, il est nécessaire en climat tropical humide :

- De maîtriser les apports solaires,
- De limiter les apports internes,
- Et surtout de bénéficier d'une ventilation naturelle performante,

Ce dernier point si fondamental nécessite de comprendre la problématique « ventilation naturelle »

dans sa globalité, à savoir de bénéficier d'études permettant de quantifier les écoulements effectifs d'irrigation interne dans les bâtiments et les associer à des débits de renouvellement d'air. Il convient donc de coupler la maîtrise de l'énergie à l'obtention de conditions de confort thermique.

L'ADEME Mayotte a choisi de mettre en place ce programme dans les établissements d'enseignement et de confier à Aérodynamique Eiffel l'étude d'un cas type, le Collège Bouéni L'ensemble des travaux a été mené en avril 2015 au Laboratoire Aérodynamique Eiffel en collaboration avec Jacques Gandemer Conseil qui intervient à la genèse sur la conception aérothermique de l'ouvrage.

OBJECTIF

Le programme d'étude comporte plusieurs phases successives d'analyse et d'essais en soufflerie, dont l'objectif est d'identifier et quantifier les niveaux de vitesse obtenus dans les différents espaces d'occupation et d'optimiser les performances aérauliques. La finalité de ces travaux est à terme d'apporter une réponse aux problèmes d'inconfort en proposant, en accord avec les concepteurs, des solutions jugées pertinentes et réalistes contrôlées par des mesures anémométriques et des visualisations avec de la fumée.

LE SUPPORT DE L'ETUDE

Les documents de référence ont été les suivants :

- ✓ Les plans numériques de l'ouvrage,
- ✓ Les données climatiques du vent,
- ✓ La fabrication de la maquette en plexiglas et de sa topographie proche en mousse à l'échelle du 1/175,
- ✓ Les différents échanges avec Jacques Gandemer,
- ✓ Le devis-programme n° 14-41 En du 31 octobre 2014.

LOCALISATION DU SITE

Le projet de construction du collège se trouve sur la commune de Bouéni qui est situé dans la partie Sud Ouest de l'Ile de Mayotte en bord de mer (**Figure 0-1** et **Figure 0-2**). On voit également sur la figure ci-dessous la localisation de la station météorologique de Dzaoudzi, située sur l'aéroport à l'Ouest de l'ile de Mayotte.

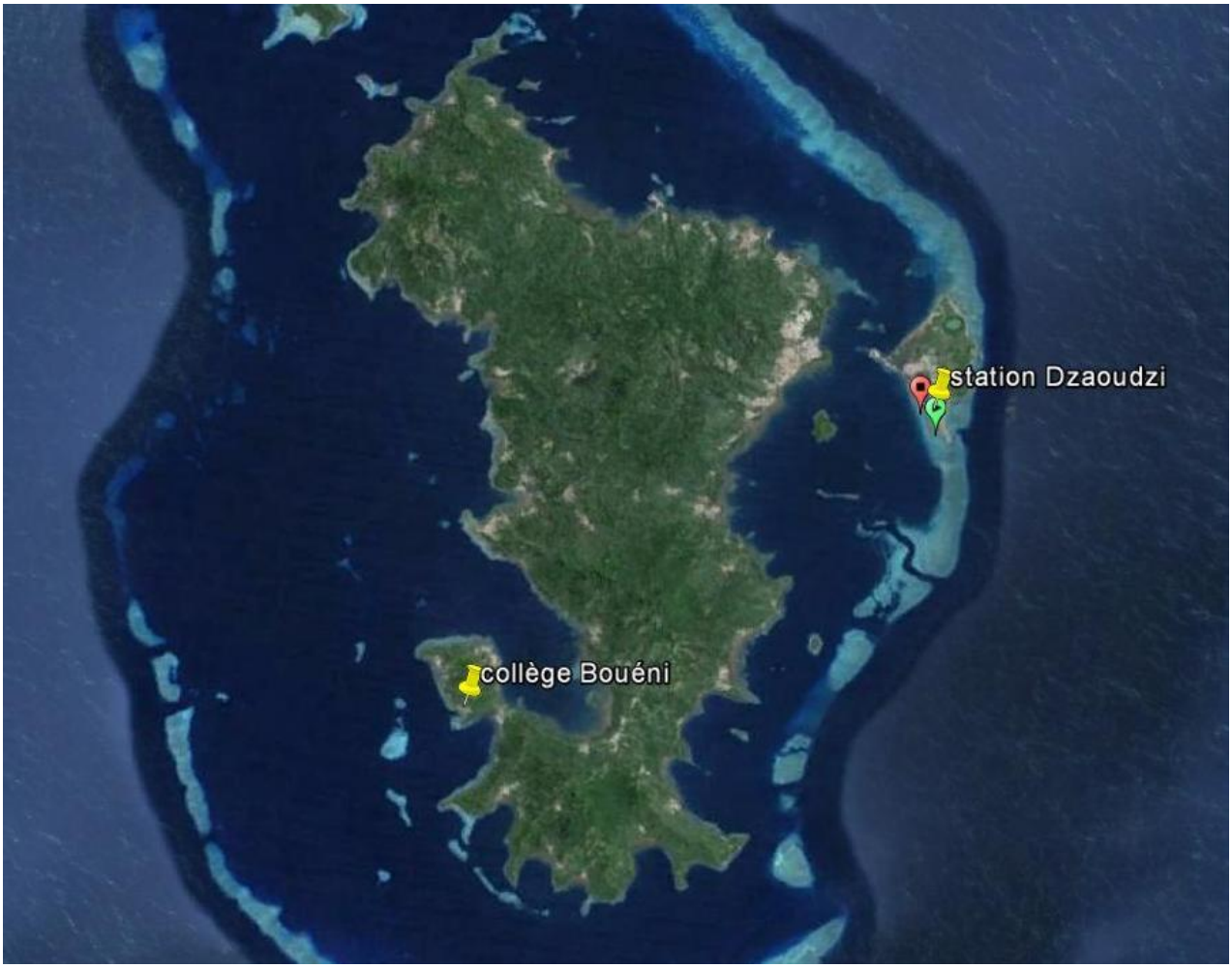


Figure 0-1 Localisation

Figure 0-2 Localisation

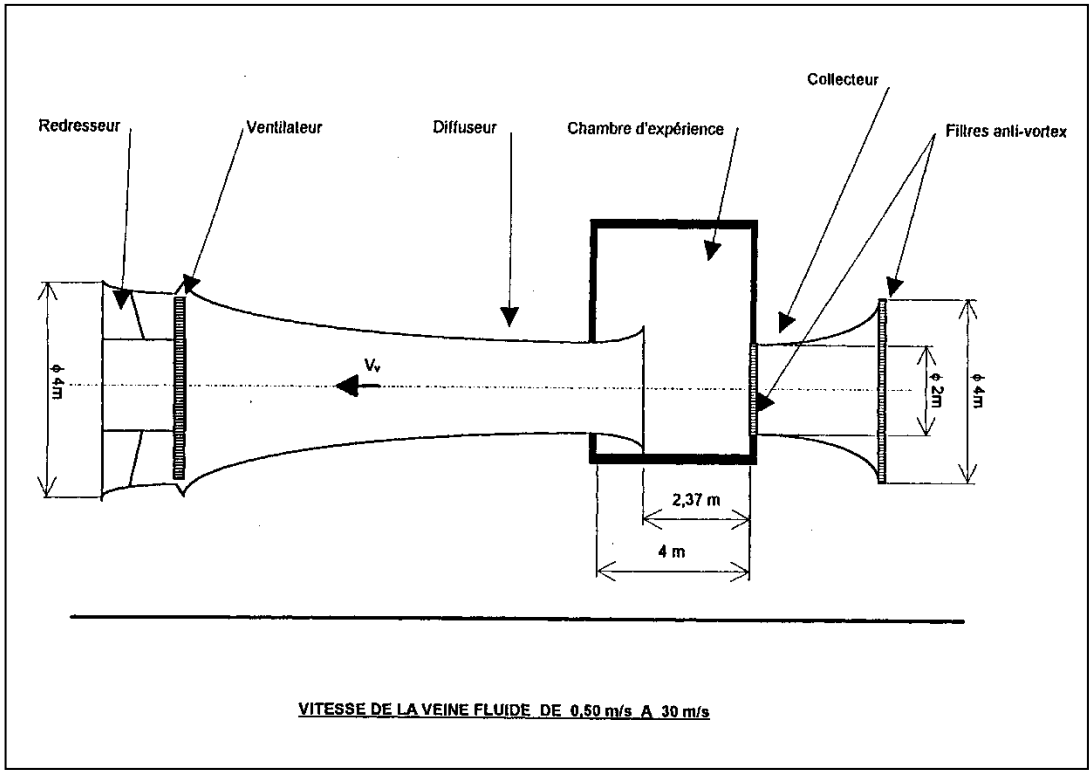
Il faut noter que le collège se trouve sur un terrain à forte pente., orienté sud-ouest vers nord-est

METHODES EXPERIMENTALES

LA SOUFFLERIE

La soufflerie d'AERODYNAMIQUE EIFFEL (cf. page suivante) à retour libre par le hall, possède une veine d'expérimentation non guidée de diamètre ϕ 2 m. Sa vitesse peut être réglée continûment entre un seuil faible de l'ordre de 0,50 m/s et un maximum variable selon l'obstruction de la veine (pouvant atteindre 30 m/s quand la veine est peu encombrée).Le fait que la veine ne soit pas guidée permet de tester des maquettes d'échelles relativement grandes sans obstruction gênante. Ceci est d'autant plus vrai que la méthode de mesure de la vitesse, dite "référence EIFFEL", ne nécessitant pas de capteur dans la veine, on ne risque donc aucune interaction maquette-capteur.

Pour cette étude, la partie amont de la veine d'essais a été modifié afin de reproduire le gradient naturel du vent et sa turbulence en similitude avec celui du site étudié.



CARATERISTIQUES DU VENT ET SIMULATION EN SOUFFLERIE

Le vent est un phénomène fluctuant. Sa vitesse varie en module et en direction au cours du temps. Elle peut s'écrire à l'instant t :

$$V(t) = \overline{V} + u'(t)$$

où $\overline{V}$ est la valeur moyenne de la vitesse sur la période d'observation T et $u'(t)$ la fluctuation longitudinale de la vitesse autour de la valeur moyenne. Ainsi, la turbulence est caractérisée par l'écart type σ de la fluctuation $u'(t)$ sur la période T :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u'^2(t).dt} = \sqrt{\overline{u'^2}}$$

L'intensité de turbulence longitudinale est reliée à l'écart type par : $I = \frac{\sigma}{\overline{V}}$.

La vitesse moyenne $\overline{V}$ et l'intensité turbulente I varient avec la hauteur z. La rugosité du sol est caractérisée par le paramètre de rugosité z_0 et la topographie du site. La croissance du module de la vitesse moyenne avec la hauteur peut être caractérisée par une loi de type logarithmique de la forme (cf. Eurocode 1, part 2-4 "actions du vent").

$$\overline{V}_z = Kr \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\overline{V}_{ref}$$

Avec :

$\overline{V}_z$: vitesse moyenne à la hauteur z en site de rugosité z_0
$\overline{V}_{ref}$: vitesse moyenne de référence météorologique, à 10 m, en site de rugosité $z_0 = 0{,}05$ m
K_r : facteur de rugosité
z : hauteur considérée

Les profils théoriques de vitesse et d'intensité turbulents sont calculés à partir des formules suivantes lorsque la hauteur z est supérieure à une valeur minimale h_{min} (en deçà le profil est considéré constant et égal à la valeur obtenue pour cette hauteur) :

En référence au Document d'Application National (DAN) de l'Eurocode, le site du collège Bouéni peut être assimilé à un terrain de catégorie 0, coté du sud à ouest, secteur où l'on trouve les vents dominants et un terrain de catégorie IIIa de l'autre côté où les vents sont plus rares. Nous avons choisi de reproduire le gradient 0 compte tenu du gradient moyen pour les 2 types de rugosité. Le paramètre de rugosité z_0, le facteur de terrain K_t et le facteur de rugosité K_r prennent les valeurs suivantes :

Catégorie de terrain	Paramètre de rugosité z_0	Coefficient de rugosité k_r
Rugosité 0	0,005 m	0,16

Le vent est simulé en soufflerie au moyen de rugosités et de générateurs de tourbillons placés en amont du modèle comme on peut le voir sur la photographie ci-dessous (**Figure 0-3**).

Figure 0-3 Soufflerie Eiffel

Le gradient de vitesse moyenne est présenté ci-dessous et la comparaison avec les profils théoriques montre un bon accord pour les hauteurs qui concernent la structure (Figure 0-4).

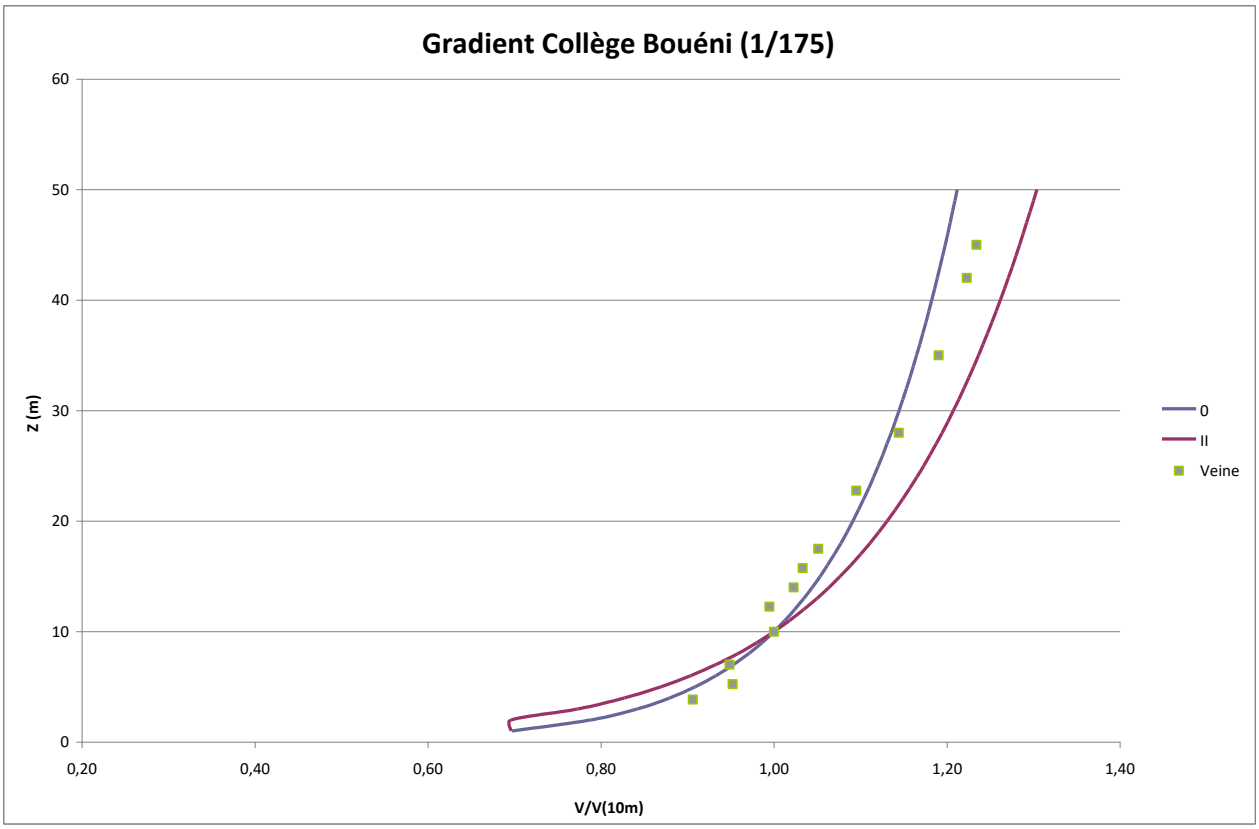


Figure 0-4 – Comparaison entre la courbe théorique pour un vent de rugosité 0 (violet) et II (jaune) et la courbe effective du gradient de vitesse dans la veine (points vert)

L'intensité de turbulence modélisé pour ces essais est de 12% tout à fait comparable à une turbulence d'un terrain de rugosité 0 dans la hauteur d'étude.

L' INSTRUMENTATION

Le matériel de mesure était composé des appareils suivants :

- ✓ Un thermomètre de laboratoire,
- ✓ Un baromètre type LEHALLE,
- ✓ Tube de Pitot,
- ✓ Micro manomètres de marque Furness permettant la mesure de la pression dynamique du vent,
- ✓ Un ordinateur équipé d'une carte d'acquisition pilotée par un logiciel développé sous LABVIEW,
- ✓ Des sondes anémométriques « film chaud »,
- ✓ Un générateur du fumigène.

LA MAQUETTE

La maquette est réalisée à l'échelle 1/175. L'échelle de la maquette a été choisie pour être significative et représentative de la restitution du champ de pressions moteur de la ventilation mais aussi, pour pouvoir intégrer l'environnement immédiat bâti et l'un effet topographique du site.

La maquette est construite avec plusieurs matériaux :

- ✓ Le plancher est en bois ;
- ✓ Le volume de le topographie est en mousse (polystyrène extrudé),
- ✓ Les bâtiments d'étude en plexiglas, les autres en mousse.

Les photographies des pages suivantes montrent la maquette en phase de construction puis lors des premiers essais. (**Figure 0-5**, à **Figure 0**-13)

La maquette expérimentale est modifiable en fonction des paramètres de l'étude et des objectifs à atteindre en ventilation naturelle. Elle reproduit fidèlement la géométrie et l'architecture du bâtiment ainsi que toutes les entrées et sorties d'air.

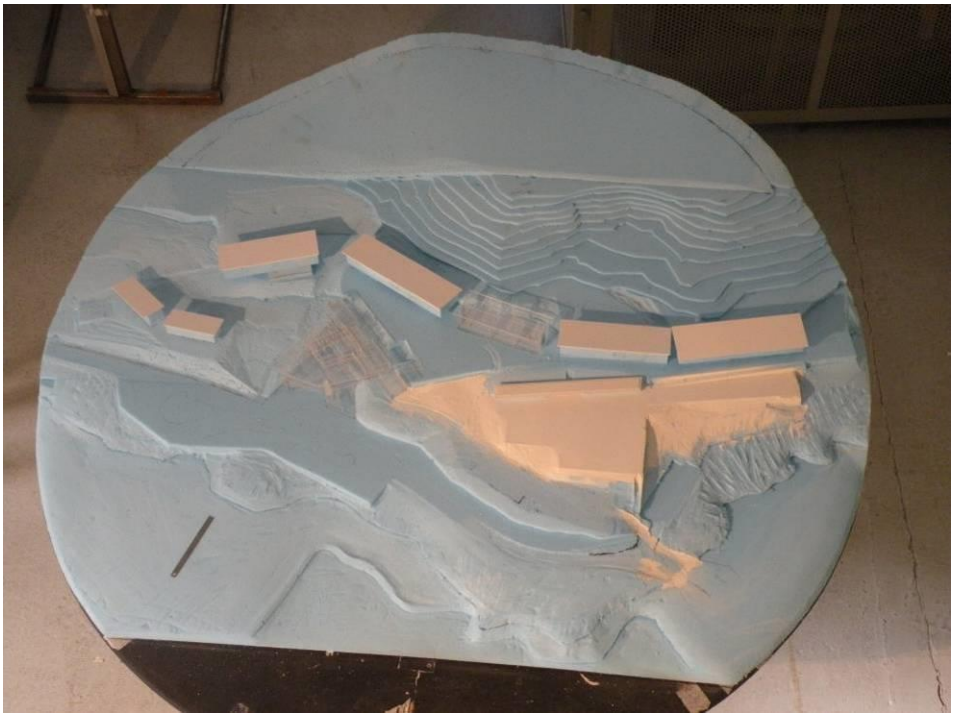


Figure 0-5 Photo de la maquette en cours de réalisation,

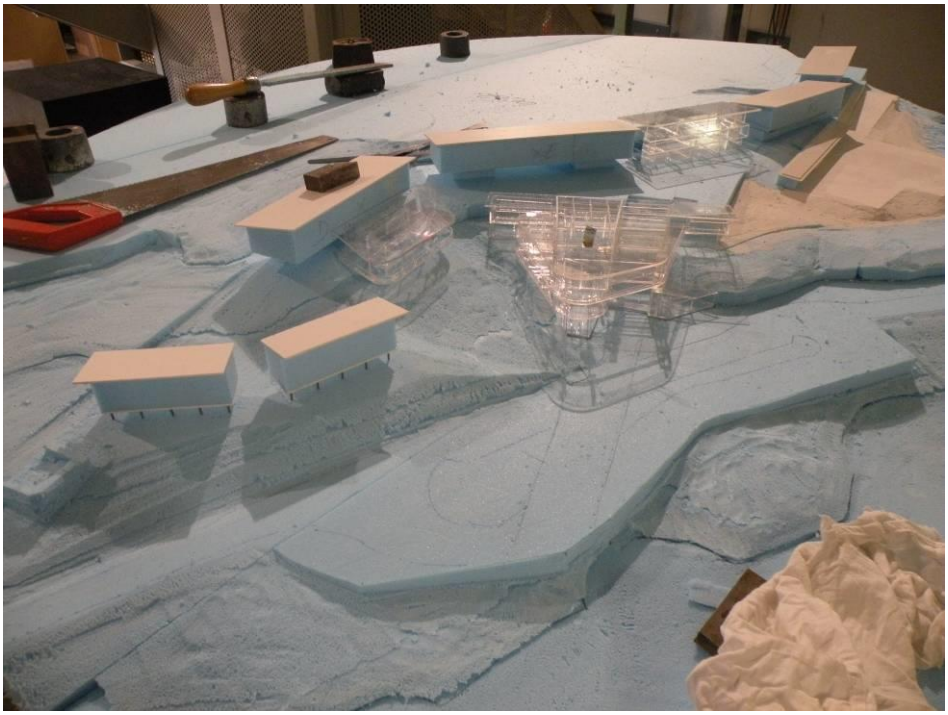


Figure 0-6 Photo maquette en cours de réalisation

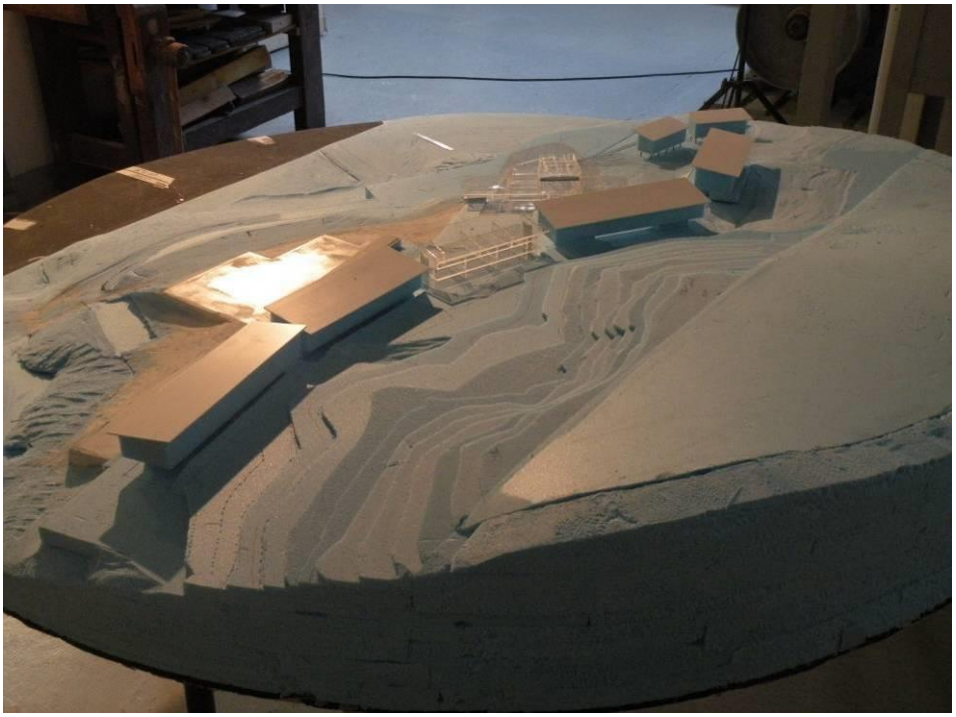


Figure 0-5 Photo maquette en cours de réalisation

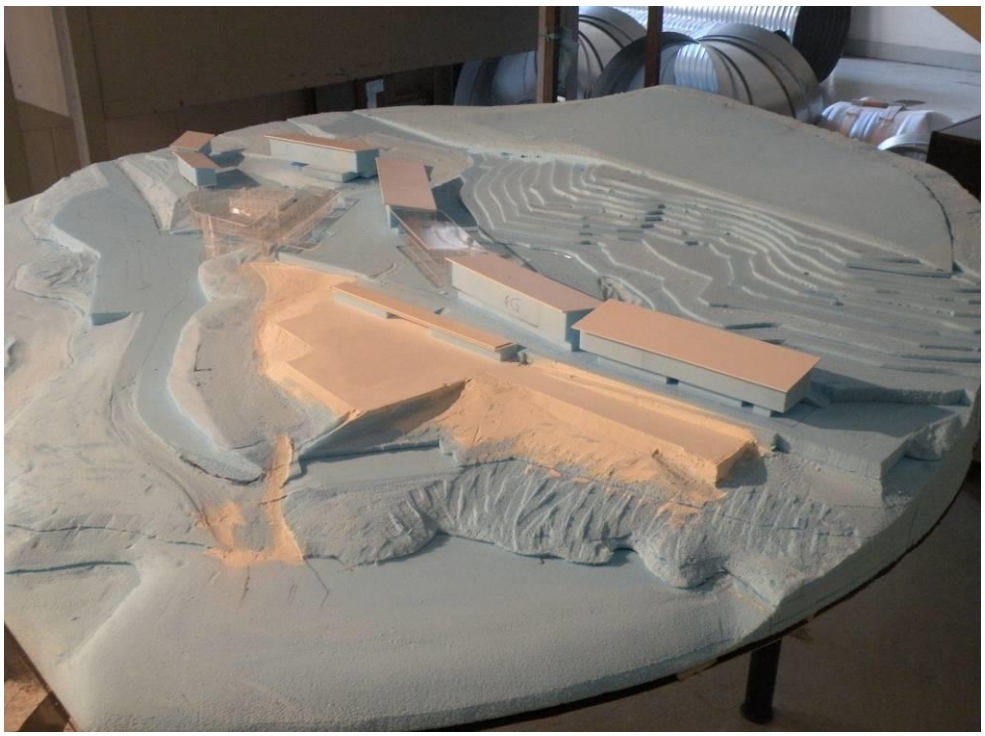


Figure 0-6 Photo maquette en cours de réalisation

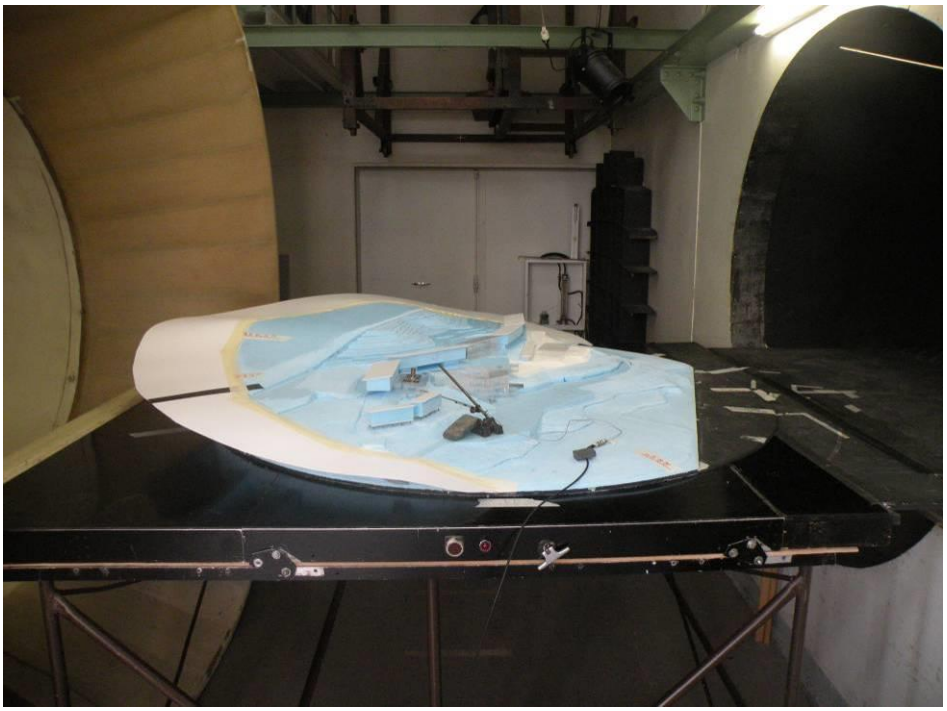


Figure 0-7 Photo de la maquette en soufflerie

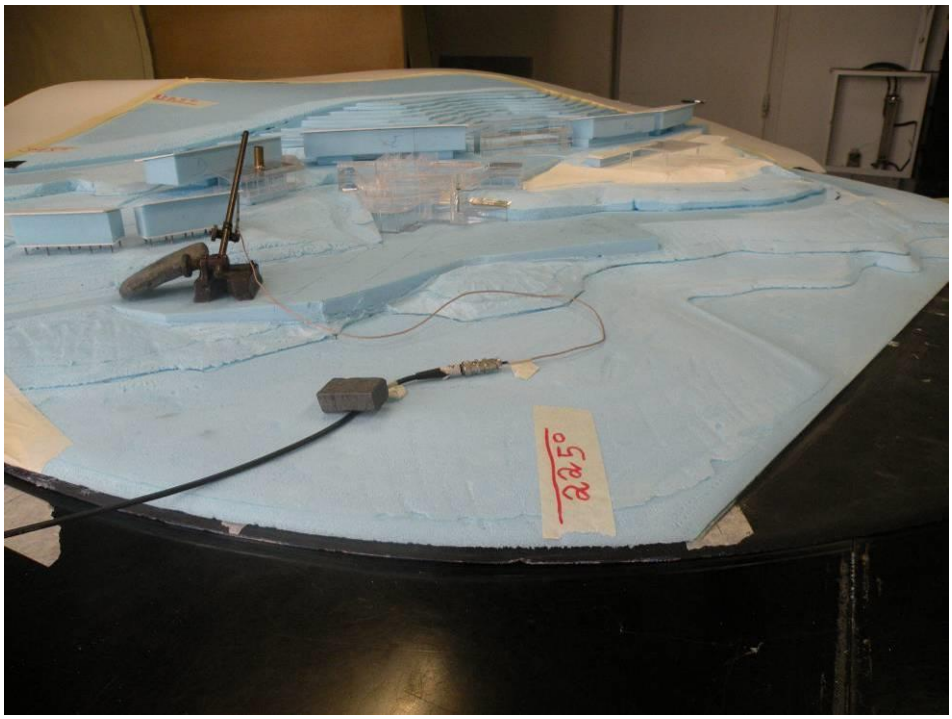


Figure 0-8 Photo maquette en soufflerie

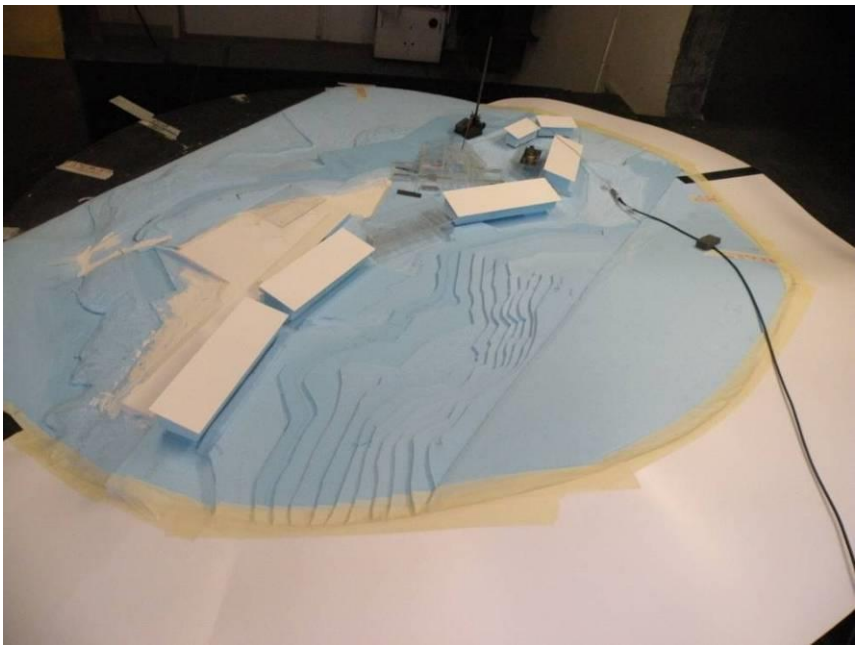


Figure 0-9 Photo maquette en soufflerie

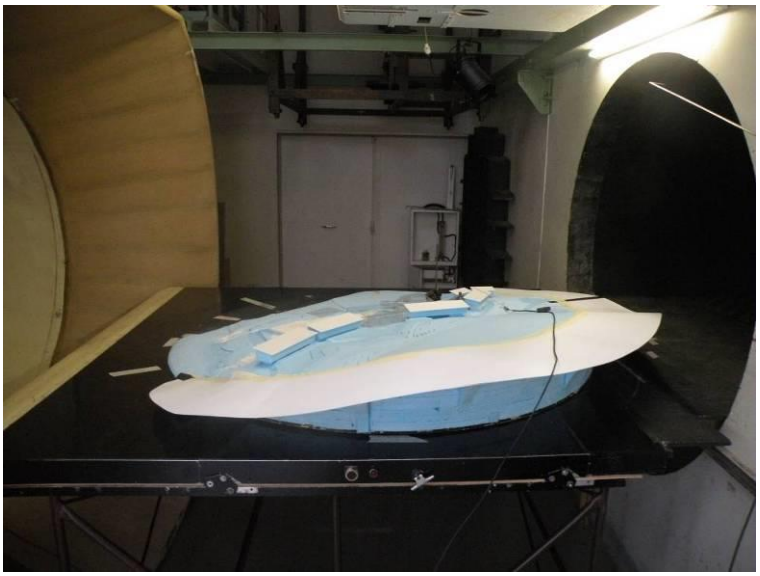


Figure 0-10 Photo maquette en soufflerie

NOTA : on remarquera sur la photographie ci-dessous les plans horizontaux dont le débord est aussi long que la hauteur de la topographie au même endroit. Ils permettent d'empêcher le décollement des flux d'air lié à la marche et d'avoir des coutants d'air généraux parallèle à la pente.

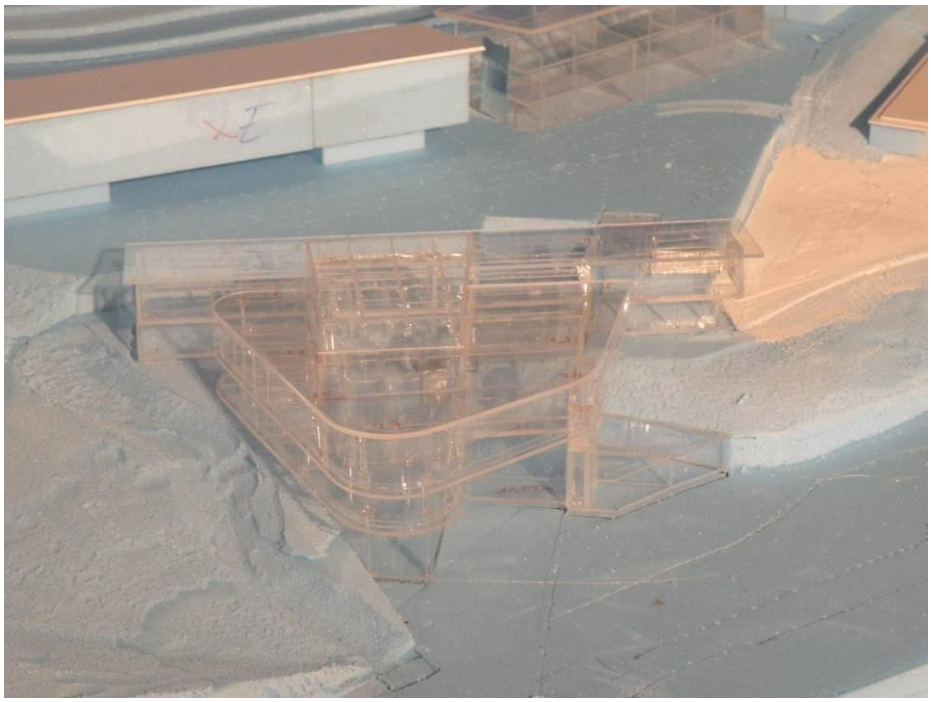


Figure 0-11 Photo maquette bâtiment administratif

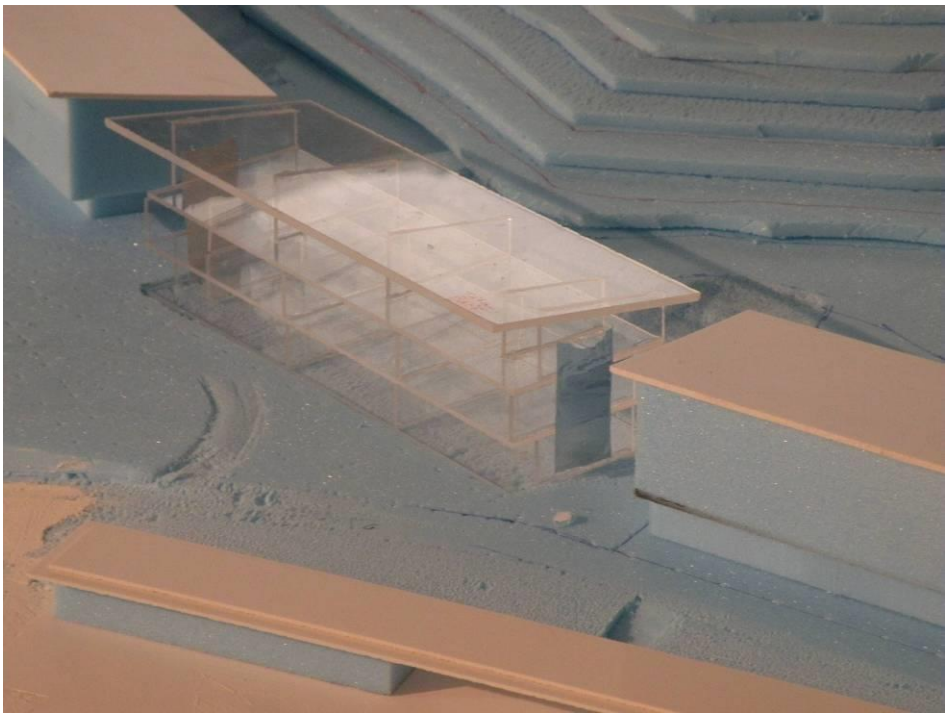


Figure 0-12 Photo maquette bâtiment F

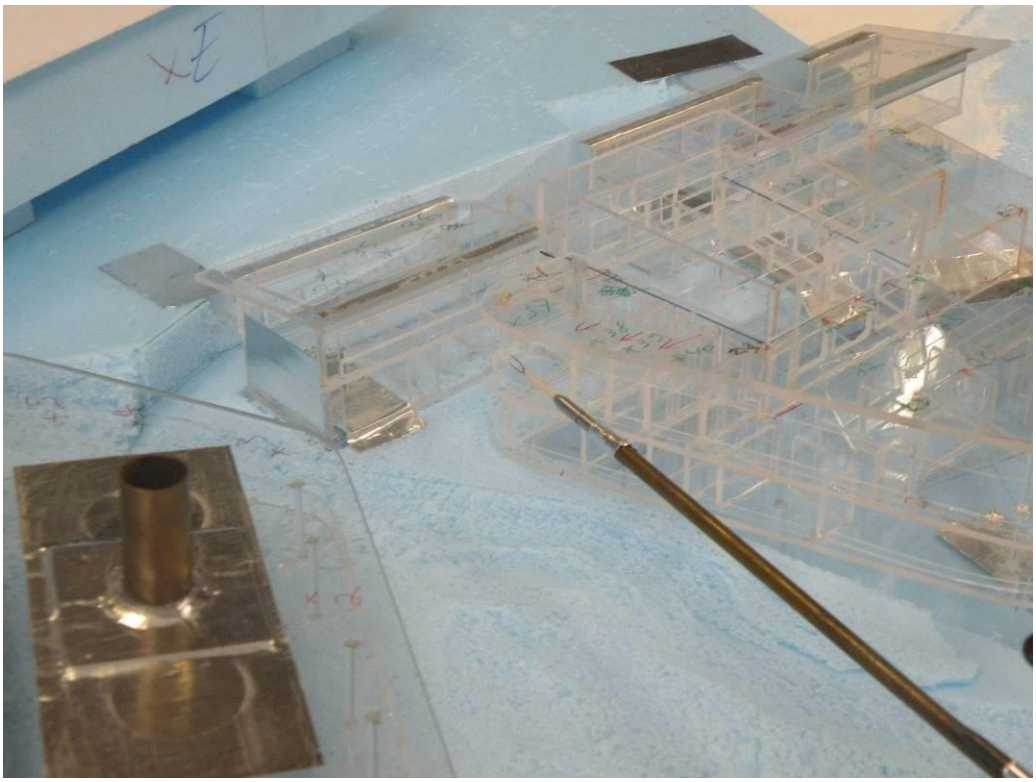


Figure 0-13 Photo maquette bâtiment restauration

Le bâtiment de restauration est équipée de 3 ventilateurs dans le patio. Afin de simuler leur fonctionnement sur maquette, un dispositif d'aspiration a été installé permettant de simuler une vitesse d'aspiration de 2.5 m/s .

APPROCHE THEORIQUE DE LA PROBLEMATIQUE : VENTILATION NATURELLE

LE PARAMETRE DE LA GENE

La conception en ventilation naturelle d'un collège qui comprend des salles de classes, des locaux d'administration et techniques implique au préalable la caractérisation du confort en climat tropical humide. Si l'on se place du point de vue de la ventilation naturelle, objet de cette étude, la notion de température résultante est insuffisante, en effet il faut tenir compte de la *vitesse de l'air* qui joue un rôle important sur l'occupant en favorisant les échanges par convection et évaporation entre la peau et le milieu ambiant.

Plusieurs indices de confort permettent de traduire les sensations d'un individu vis-à-vis de ces phénomènes ; Le plus représentatif pour notre étude est l'indice de la température effective (S.E.T.) défini par GAGGE. Cet indice décrit la sensation d'un individu d'après l'échelle suivante :

-3	-2	-1	0	1	2	3
froid	frais	légèrement frais	neutre	légèrement neutre	tiède	chaud

Cette sensation est conditionnée par la vêture et l'activité du sujet et aussi par la température, la vitesse de l'air et l'hygrométrie. Par exemple, dans notre cas d'étude nous avons retenu pour l'individu une activité légère (1.2 MET) et une vêture usuelle sous ce genre de climat (chemise et pantalon légers ~ 0.4 CLO).

Le réseau de courbes présenté fait alors apparaître l'évolution de la sensation de confort avec la température et la vitesse de l'air à l'intérieur des locaux. La zone bleue (**Figure 0-7**) correspondant à une sensation notée de + 0.5 à - 0.5 donnent les limites de la zone où 90% des individus éprouvent réellement une sensation de confort ("zone de confort"). Il faut remarquer que le réseau de courbes perd son sens en dessous de 0.25 m/s, car alors la convection naturelle n'est plus négligeable.

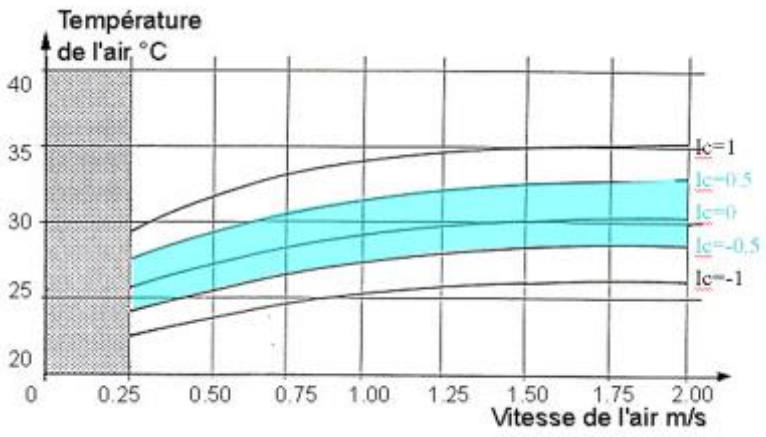


Figure 0-7 : Variation de la sensation de confort en fonction de la vitesse et de la température de l'air (activité : 1.2 MET, vêture : 0.4 CLO, humidité : 16 g d'eau/kg air sec)

Si l'on se place dans les conditions de sensation neutre ($\mathbf{I_c = 0}$) et que l'on observe les couples "vitesse d'air, température de l'air" produisant cette sensation, on a en particulier :

Vitesse de l'air (m/s)	0.3	0.7	1.1	1.5	1.9
Température de l'air (°C)	26	28.5	29.5	30	30.25

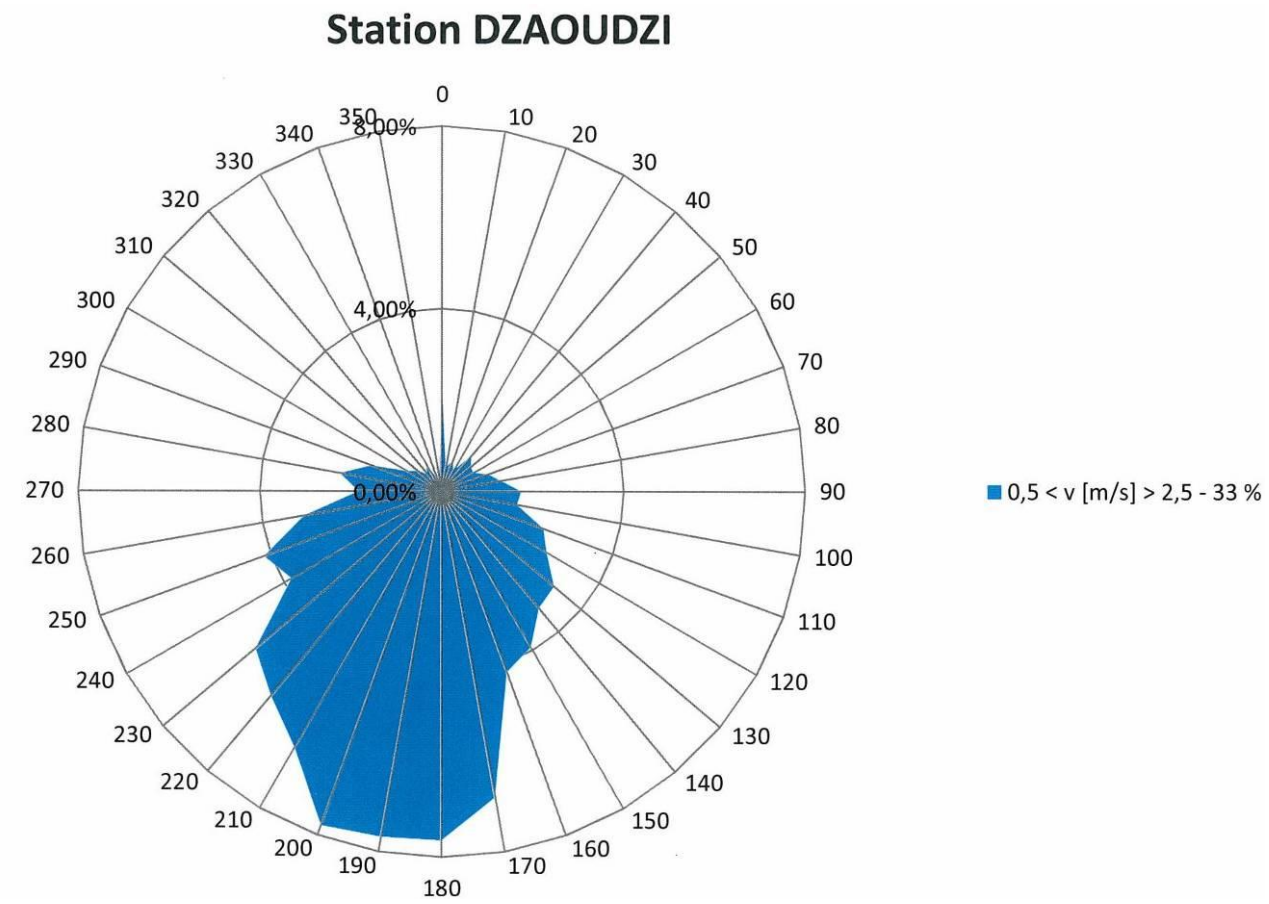
Toutes choses égales par ailleurs, on éprouve la même sensation de confort à 30°C lorsque la vitesse de l'air est de 1.5 m/s qu'à 26°C en air calme. Dans ce cas, la ventilation naturelle est équivalente à une baisse de 4°C de la température ressentie.

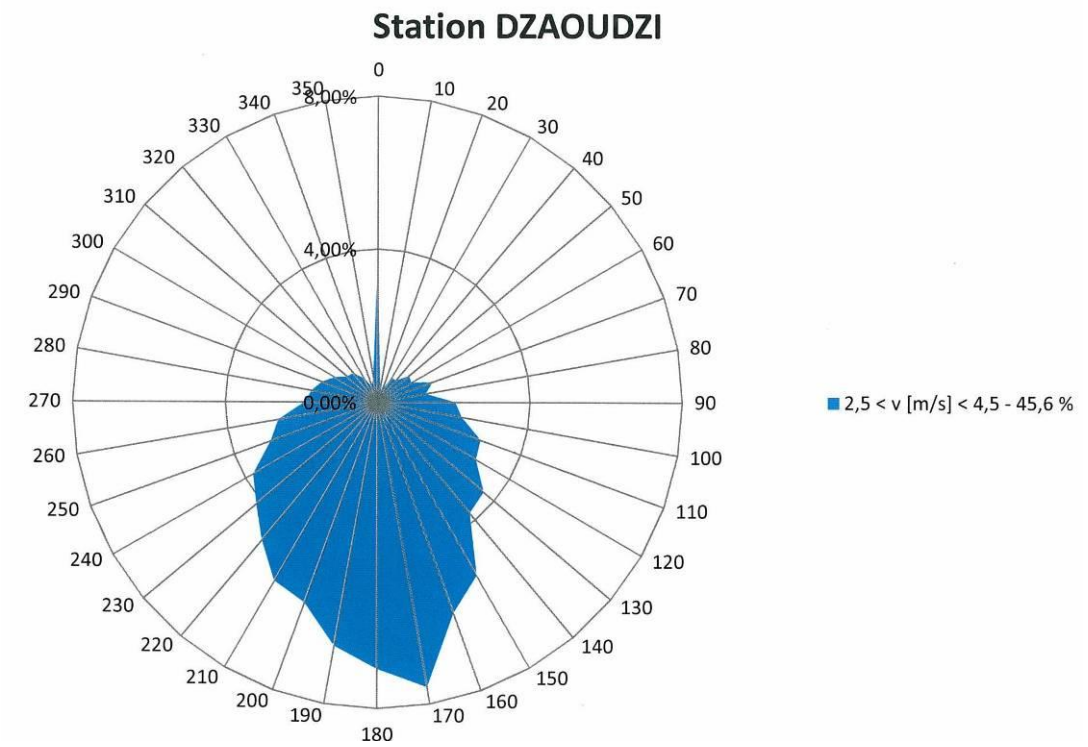
Si pendant les périodes les moins chaudes, une vitesse d'air de 0.3 m/s est suffisante, on constate que pendant les périodes les plus chaudes, des vitesses d'air de l'ordre de **0.5 m/s à 1.5 m/s** sont nécessaires.

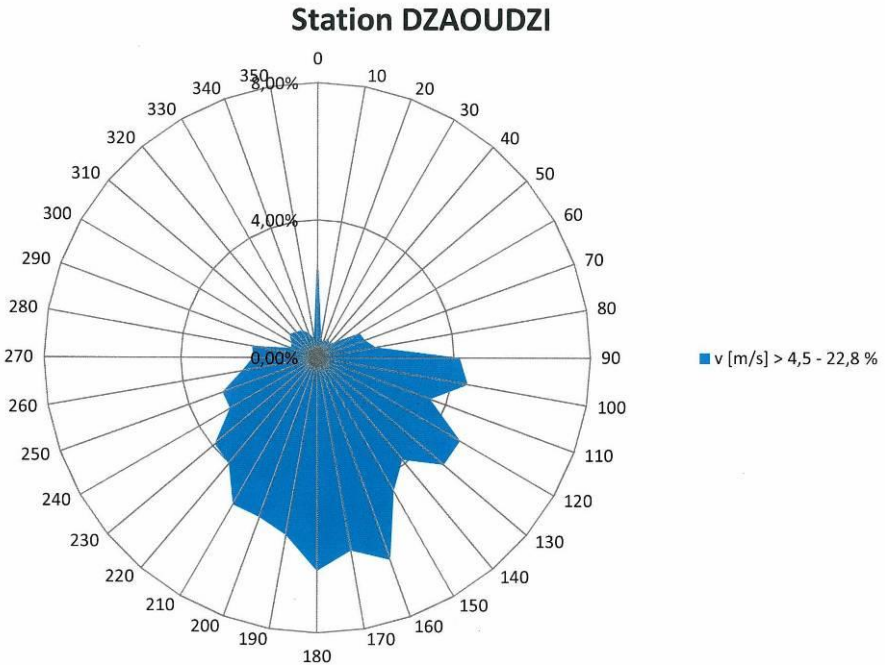
En conclusion, l'enjeu d'une ventilation naturelle efficace en climat tropical humide et notamment pendant les périodes les plus chaudes Tair < 32°C), est d'abaisser de 3 à 4°C la température effective ressentie, afin de se placer dans des conditions de confort type ($-0.5 \leq I_c \leq 0.5$) en créant à l'intérieur des locaux des circulations fluides suffisantes, soit de 0.5 à 1.5 m/s environ (valeur moyenne ~ 1 m/s).

RECALAGE DES VITESSES DE VENT PAR RAPPORT A LA REFERENCE DE LA STATION METEOROLOGIQUE ET COEFFICIENT LOCAL

Les données météorologiques viennent de la Station Dzaoudzi, située à 25 km au Nord/Nord-Est du projet ont été fournies par Simon Chauvat de LEU puis traitées pour avoir la rose des vents pour des vitesses de 0,5 à 2,5 m/s, de 2,5 à 4,5 m/s et au-dessus de 4,5 m/s. Les 3 roses des vents sont présentées ci-dessous.







On constate que les vents sont très majoritairement dans le secteur Sud-Est à Sud-Ouest et que les vents sont supérieurs à 2,5 m/s 66% du temps.

La période critique pour la ventilation naturelle se situe la journée pendant les mois d'été, de décembre à mars. Pour cette période on a quelques vents de Nord-Ouest et de Nord-Est mais la majorité des flux d'irrigation sont de secteur Sud/Sud-Est à Ouest. Il a été décidé d'étudier essentiellement les vents d'azimuts Sud/Sud –Est (157,5°), Sud-Ouest (225°), Nord-Ouest (315°) et Nord-Nord-Ouest (337,5°).

On prendra comme vitesse de référence à une hauteur de 10 m à la station de Dzaoudzi la valeur de 2,5 m/s :

- $\overline{U}ref = 2.5 m/s$

Compte tenu que la Station météorologique est proche de la mer, nous avons choisi de conserver la même vitesse de référence entre le site et celle mesurée à 10 m de hauteur à la station météorologique. Ce choix est sécuritaire car en générale les stations météorologiques sont installées sur des sites de rugosité II, ce qui nécessiterait d'augmenter la vitesse sur le site du collège en rugosité 0 :

$$\overline{U}_{ref\,10m} = \cdot\overline{U}_{10méteo}$$

Nous mesurons en chaque point "i" la vitesse de l'écoulement, soit :

A une hauteur de 8 mm au dessus du sol (1.5 m vraie grandeur) en une implantation représentative dans les pièces d'activité,

Au centre d'ouverture (portes ou fenêtre) ce qui pourrait permettre de calculer des débits de renouvellement d'air.

Donc les résultats de mesure en soufflerie sont exprimés sous la forme d'un coefficient de vitesse sans dimension:

$$Cli = \frac{\overline{U}_i}{\overline{U}_{ref}}$$

On présentera également les résultats sous forme d'une vitesse calculée en chaque point pour une vitesse de référence Uréf = 2,5 m/s

CONDITION D'UNE BONNE IRRIGATION

Le critère adopté est que l'effet dynamique du vent doit être toujours supérieur à l'effet thermique de convection naturelle (afin d'empêcher toutes stratifications thermiques) et précisément que la vitesse dans les pièces soit supérieure à **0,5 m/s** . Il faut aussi souligner, que le problème fondamental est la sous-ventilation des locaux et pas la sur ventilation. En effet l'usager est toujours capable de gérer la ventilation de son espace et contrôler le réglage des ouvrants.

Dans notre approche sur maquettes en soufflerie nous avons déterminé (anémométrie) les coefficients Cl locaux et les vitesses réelles correspondantes de façon à pouvoir vérifier si l'irrigation intérieur est suffisant.

IMPLANTATION DES POINTS DE MESURE

Trois des bâtiments du site ont été étudiés pour la ventilation naturelle :

- Bâtiment Restauration – Positions 1 à 10 page 24
- Bâtiment F (salles de cours) – Positions 11 à 19 page 25
- Bâtiment A 2ème niveau – Positions 20 à 25 et 32 à 36 page 26
- Bâtiment A 2ème niveau – Positions 26 à 31 et 37 à 40 page 27
- Bâtiment A 1ere niveau – Positions 41 à 46 page 28

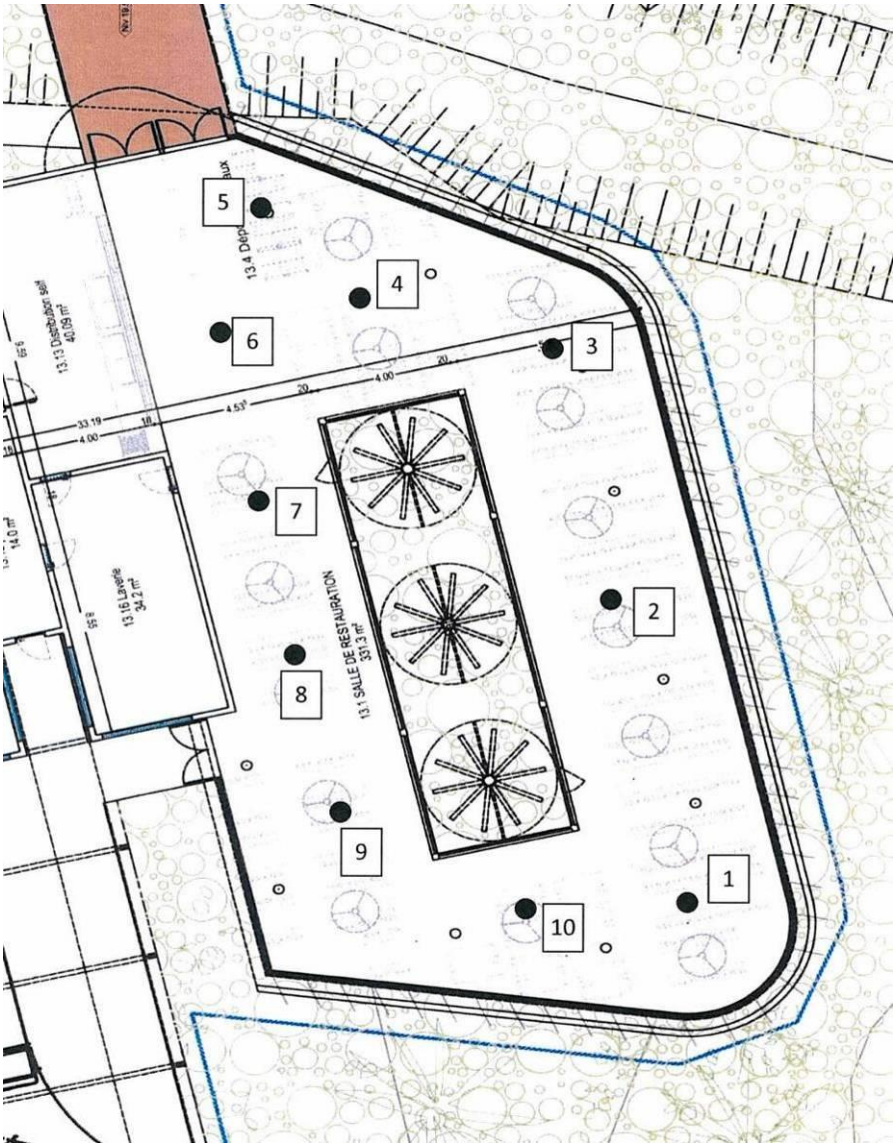


Figure 5-1 - Implantation points de mesures Bâtiment de Restauration

Figure 5-2 - Implantation points de mesures Bâtiment F

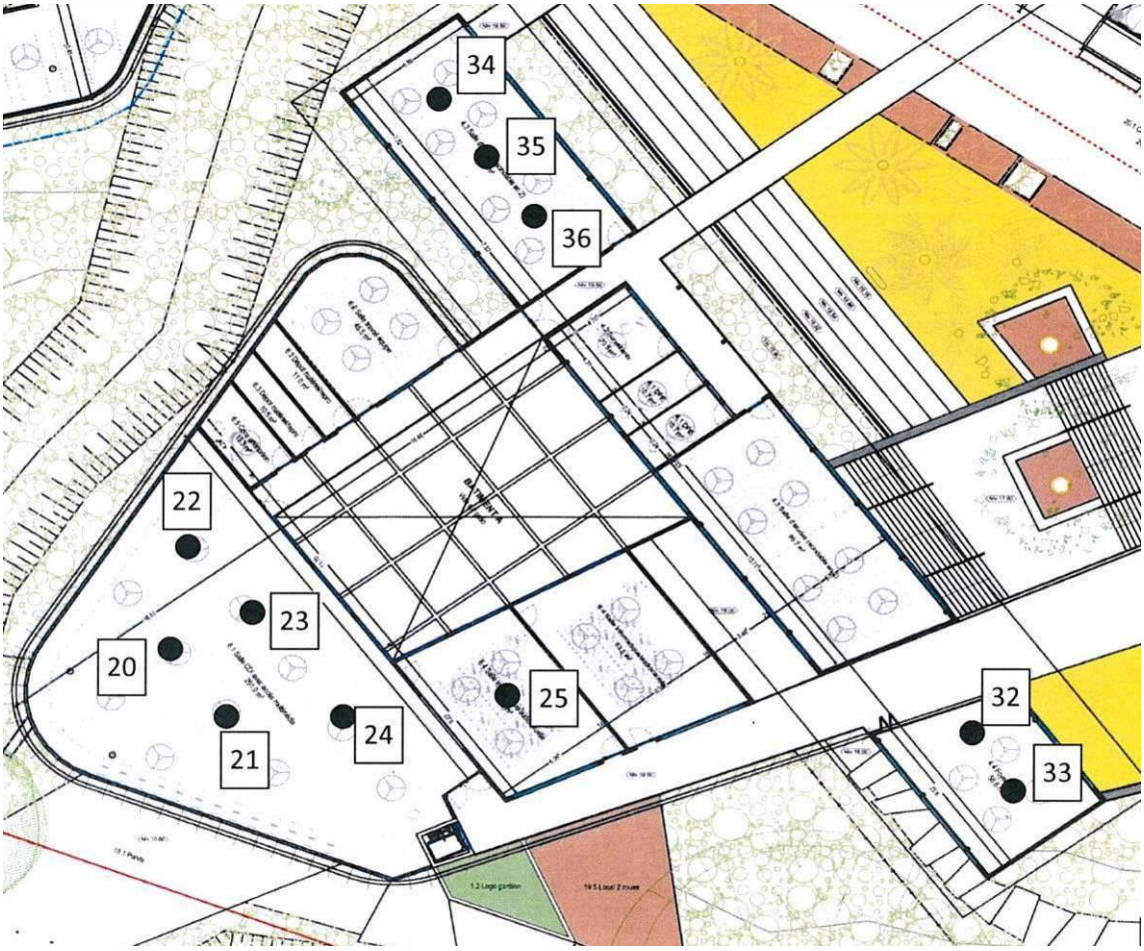


Figure 5-3 - Implantation points de mesures Bâtiment A 2ème étage

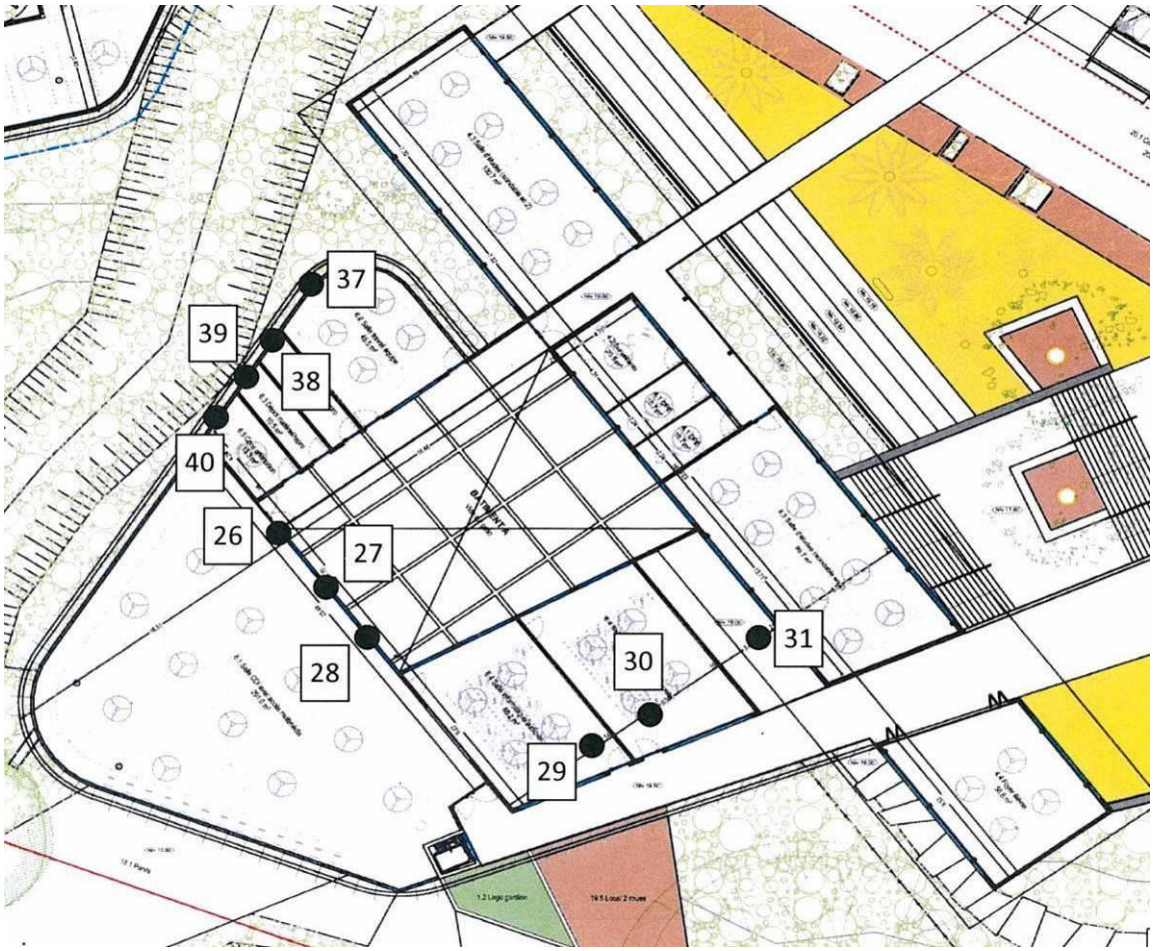


Figure 5-4 - Implantation points de mesures Bâtiment A 2ème étage

Les vitesses des points 26 à 31 et 38 à 40 sont mesurées au centre de fenêtre dont les surfaces à l'échelle 1 sont les suivantes :

- Point 26 : S = 5 m²
- Points 27 et 28 : S = 5 m²
- Points 29 à 31 S = 4 m²
- Points 38 et 39 S = 2.8 m²
- Point 40 S = 5.5 m²

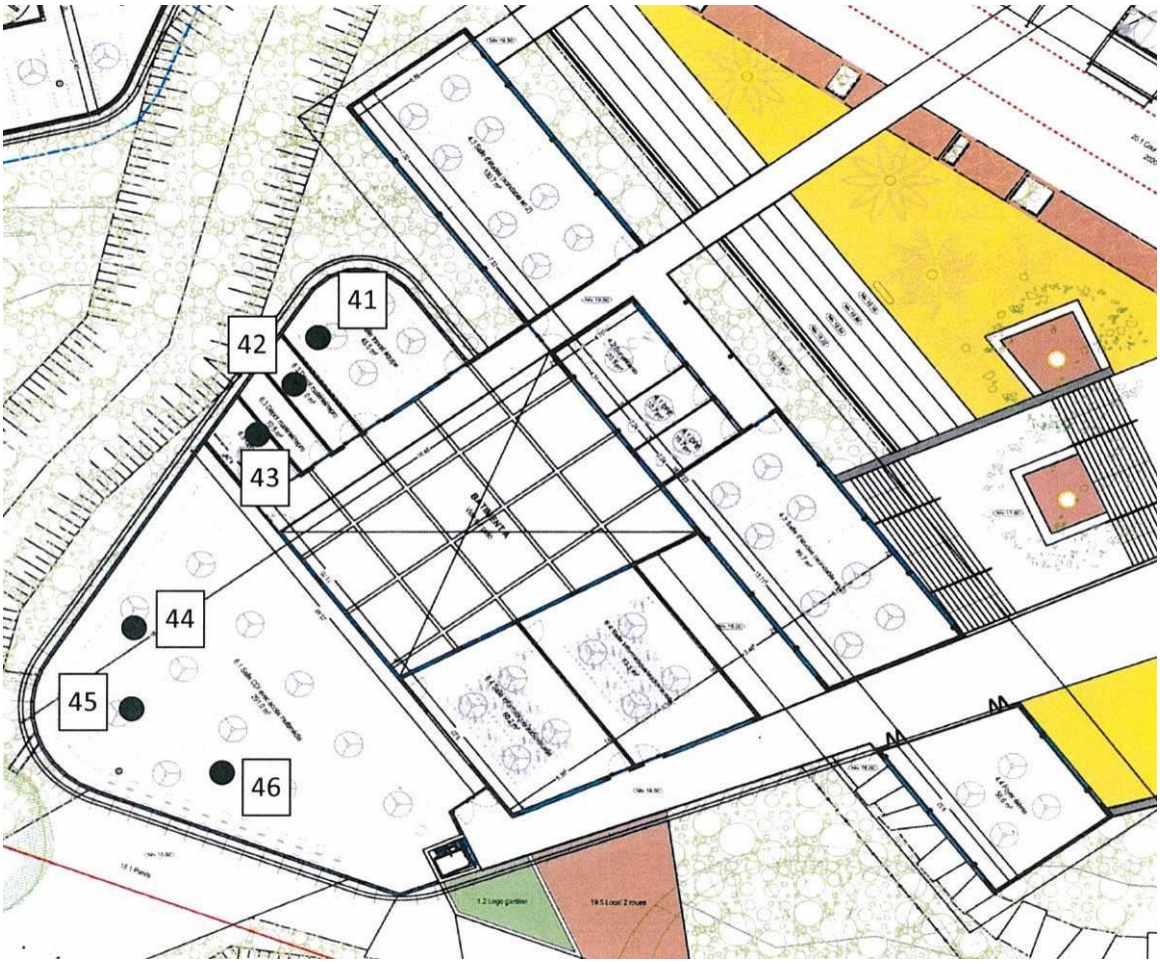


Figure 5-5 - Implantation points de mesures Bâtiment A 1er étage

RESULTATS DES ESSAIS

Les résultats sont présentés dans des tableaux sous forme de Cl locaux puis les vitesses calculées pour une vitesse Vréf10m sur site (ou en météo) de 2,5 m/s. On rappelle que les vitesses du vent sur site sont supérieurs ou égales à 2,5 m/s et dépassées 66% du temps.

Bâtiment Restauration

		157,5°	225°	315°	337,5°
	Points	Cl = U /Uréf	Cl = U /Uréf	Cl = U /Uréf	Cl = U /Uréf
Bat D - Restauration	1	0,53	0,26	0,54	0,21
	2	0,40	0,40	0,21	0,19
	3	0,31	0,41	0,23	0,20
	4	0,32	0,43	0,20	0,21
	5	0,24	0,34	0,21	0,16
	6	0,22	0,32	0,16	0,17
	7	0,43	0,39	0,17	0,16
	8	0,50	0,35	0,23	0,15
	9	0,24	0,36	0,56	0,22
	10	0,53	0,38	0,52	0,29

		157,5°	225°	315°	337,5°
	Points	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)
Bat D - Restauration	1	1,32	0,65	1,36	0,53
	2	1,01	1,00	0,51	0,47
	3	0,78	1,02	0,57	0,50
	4	0,80	1,07	0,50	0,53
	5	0,59	0,84	0,54	0,40
	6	0,54	0,80	0,41	0,43
	7	1,07	0,97	0,43	0,41
	8	1,25	0,86	0,58	0,37
	9	0,59	0,91	1,40	0,56
	10	1,34	0,94	1,30	0,72

Les cases sur fond bleu indiquent que les vitesses locales sont dans la zone de confort alors que celles sur fond rouge indiquent que les vitesses sont sous cette limite.

On voit que pour les vents les plus courants de secteur sud, venant de la mer, le confort est assuré pour plus de 66% du temps.

Pour les vents de direction 315°, la ventilation naturelle fonctionne correctement, et des vitesses locales proches de la limite inférieure de la zone de confort.

Pour les vents de direction 337,5°, venant de la montagne, on se situe légèrement en dessous de la limite de la zone de confort mais les vents sont rares pour cet azimut.

Bâtiment F – Salles de cours

		157,5°	225°	315°	337,5°
	Points	Cl = U /Uréf	Cl = U /Uréf	Cl = U /Uréf	Cl = U /Uréf
Bat F - Salles de cours	11	0,87	0,58	0,23	0,67
	12	0,93	0,51	0,27	0,83
	13	0,81	0,47	0,23	0,48
	14	0,57	0,46	0,43	0,80
	15	0,86	0,33	0,19	0,80
	16	0,92	0,52	0,67	0,79
	17	0,62	0,47	0,19	0,53
	18	0,78	0,20	0,19	0,58
	19	0,87	0,38	0,64	0,73

		157,5°	225°	315°	337,5°
	Points	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)
Bat F - Salles de cours	11	2,18	1,46	0,57	1,68
	12	2,33	1,27	0,68	2,07
	13	2,02	1,17	0,57	1,20
	14	1,42	1,14	1,08	1,99
	15	2,16	0,82	0,47	1,99
	16	2,30	1,29	1,67	1,98
	17	1,56	1,17	0,47	1,32
	18	1,96	0,49	0,48	1,44
	19	2,16	0,96	1,59	1,84

Les visualisations à la fumée (voir chapitre 7) et l'analyse des résultats nous ont amené à tester quelques modifications qui sont résumées sur les pages suivantes. Quelques données quantitatives sont fournies en exemple.

Bâtiment F – Salles de cours

		157,5°	225°	315°	337,5°
	Points	Cl = U /Uréf	Cl = U /Uréf	Cl = U /Uréf	Cl = U /Uréf
Batiment A	20	0,68	0,50	0,41	0,39
	21	0,80	0,61	0,36	0,29
	22	0,39	0,45	0,40	0,26
	23	0,42	0,47	0,36	0,22
	24	0,38	0,44	0,27	0,12
	25	0,27	0,54	0,22	0,12
	26	0,49	0,66	0,32	0,19
	27	0,60	0,64	0,43	0,17
	28	0,60	0,67	0,38	0,18
	29	0,64	0,22	0,20	0,12
	30	0,40	0,21	0,14	0,12
	31	0,48	0,24	0,13	0,13
	32	0,63	0,41	0,25	0,28
	33	0,31	0,41	0,15	0,16
	34	0,12	0,19	0,11	0,11
	35	0,17	0,19	0,14	0,12
	36	0,17	0,16	0,15	0,13
	37	0,27	0,27	0,30	0,34
	38	0,27	0,29	0,34	0,56
	39	0,27	0,28	0,35	0,53
	40	0,26	0,23	0,35	0,56
	41	0,28	0,26	0,24	0,21
	42	0,44	0,29	0,32	0,40
	43	0,12	0,36	0,26	0,31
	44	0,69	0,50	0,53	0,26
	45	0,71	0,41	0,50	0,36
	46	0,87	0,32	0,45	0,19

		157,5°	225°	315°	337,5°
	Points	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)	Vlocale (m/s)
Batiment A	20	1,70	1,25	1,02	0,97
	21	2,00	1,53	0,90	0,73
	22	0,98	1,12	1,00	0,64
	23	1,05	1,19	0,89	0,55
	24	0,94	1,10	0,68	0,31
	25	0,69	1,34	0,55	0,29
	26	1,24	1,66	0,79	0,48
	27	1,50	1,59	1,06	0,42
	28	1,50	1,68	0,96	0,44
	29	1,61	0,55	0,51	0,30
	30	0,99	0,52	0,36	0,30
	31	1,20	0,60	0,33	0,32
	32	1,57	1,02	0,64	0,70
	33	0,78	1,04	0,38	0,40
	34	0,30	0,48	0,27	0,29
	35	0,42	0,48	0,35	0,31
	36	0,43	0,40	0,37	0,33
	37	0,69	0,67	0,75	0,85
	38	0,67	0,73	0,85	1,41
	39	0,68	0,70	0,88	1,32
	40	0,64	0,59	0,89	1,41
	41	0,70	0,65	0,60	0,54
	42	1,09	0,72	0,80	1,00
	43	0,30	0,89	0,65	0,79
	44	1,73	1,25	1,33	0,66
	45	1,77	1,02	1,26	0,91
	46	2,18	0,80	1,13	0,47

CONCLUSION

A Paris, le 30 avril 2015

Benoit Blanchard

Gérant

Jacques GANDEMER

Conseil

117 rue de la Mairie

44240 Sucé sur Erdre

Tel : 0 954 333 957

Mobile : 06 87 70 12 10

Sucé le 14 05 2015

Synthèse sur le développement en ventilation naturelle du Collège Bouéni à Mayotte

1- Rappel sur les enjeux, sur les objectifs de la ventilation naturelle et sur l'architecture climatique en milieu tropical humide

Les finalités de la ventilation naturelle sont multiples :

- Assurer la qualité de l'air hygiénique intérieur. Dans ce contexte (régit par la réglementation) il est demandé des taux de renouvellement d'air de l'ordre d'un à deux volumes/heure pour les salles de classe par exemple.

- Evacuer les charges thermiques intérieurs, tels que celles émises par les sources chaudes (éclairage artificiel, ordinateurs etc., mais aussi les parois chaudes rayonnant à l'intérieur, et les occupants).

Pour un bâtiment de conception thermique correcte, on constate physiquement qu'en général les charges thermiques sont correctement évacuées (température intérieure identique à celle à l'extérieur sous abri ventilé) pour des taux de renouvellement d'air de l'ordre de 15 volumes/heure.

Note 1: Un bâtiment sera de conception thermique correcte s'il considère notamment les différents paramètres suivants :

- couleurs extérieures claires ou réfléchissantes

- protection des ouvertures et baies du soleil directe au Nord (et si possible à l'Ouest et à l'Est)

- bonne protection solaire en toiture (double toit ventilé ou isolation appropriée) et isolation complémentaire en façades Ouest et Est

- matériaux à très faible émissivité (vers l'intérieur) etc.)

Note 2 : En terme d'évaluation des charges de « fonctionnement interne », le corps humain représente une puissance variable en fonction de son activité, mais pour une activité scolaire on peut proposer 100W par occupant, et par ordinateur.

- Développer le confort thermique de l'occupant dans ses espaces et couches de vie, en créant des vitesses d'irrigation suffisantes : Pour des gammes de vitesses de balayage de l'air de 0.5 m/s à 1.5 m/s, (échanges accélérés en convection forcée entre le corps humain et son environnement extérieur), la température effective ressentie par le corps humain est de 4°C

inferieure à celle de l'ambiance thermique physique (24°C par exemple alors que le thermomètre indique 28°C). Cette baisse de température peut être augmentée avec la vitesse de l'air, mais on admet que pour V> 2.5m/s la gêne peut commencer.

Si l'on traduit cette gamme de niveaux de vitesses de balayage internes (permettant d'obtenir une température ressentie de -4°à -5°C) en taux de renouvellement d'air on dépasse les 100 volumes/heure.

Note 3 : Ces écoulements internes débitants sont des écoulements fluctuant (turbulents). Ils résultent d'écoulements équilibrage entre les ouvertures en façade et toitures qui ne sont pas à la même pression. Le champs de pression externe moteur du mécanisme est lui-même turbulent, et résulte de l'interaction du vent incident (fluctuant) et de la géométrie de l'obstacle bâti.

En objectif stratégique de développement d'une ventilation naturelle appliquée au confort thermique il existe une condition fondamentale : si l'on ne peut pas toujours avoir une conception aérodynamique et aéraulique suffisamment performante pour atteindre les niveaux de vitesses recherchés pour le confort thermique ou qu'en en fonction des sites et de leur environnement le « signal » vent se trouve freiné ou renduit, il faudra cependant et impérativement assurer une conception aérodynamique permettant des taux de renouvellement d'air supérieurs à 15 volume /heure. Dans ces conditions les charges thermiques internes sont évacuées, et on utilisera des brasseurs d'air (adaptés et correctement répartis) pour créer une dynamique de 1 m/s des écoulements de brassage pour assurer le confort thermique ressenti. Dans ces conditions le confort sera alors semblable à celui obtenu précédemment avec la meilleure conception aérodynamique autorisant des vitesses d'irrigation « naturelles » allant de 0.5 m/s à 2 m/s.

Note 4: Il est évident que lorsque la conception climatique de la construction traite le confort thermique des espaces, les « contraintes » de décharge thermique et d'hygiène de l'air sont largement résolues.

L'Architecture climatique considère globalement le vent, le soleil, la pluie, le végétal et l'eau, et utilise ces potentiels climatiques naturels à des fins de contrôle et de développement du confort thermique de l'usager. Cependant dans le développement en ventilation naturelle de la construction, le vent représente évidemment le paramètre déterminant.

Pour réussir une ventilation naturelle efficace dans un Projet, il est indispensable que :

- Le « signal » vent soit suffisant sur le site (exemple de critère : vitesse moyenne de 3 m/s à 10 m de hauteur sur le site dépassée pendant plus de 50% du temps). La force du vent, fonction de la direction, est pondérée par le jeu des rugosités amonts (bâties et végétales) , et les effets topographiques. Un recalage climatique du site par rapport aux données de la station météorologique doit être fait.

- L'environnement immédiat, qui interfère aérodynamiquement directement avec le projet (effets de sillage, de masque etc.), soit pris en compte dans une approche système.

- L'architecture externe, par sa géométrie et son organisation, permette une implantation et un dimensionnement correct des transparences et ouïes d'admission d'air en façades.

Note 5 : En général 30% à 50% de porosité de façade sont nécessaire, avec un contrôle progressif des ouvertures d'une part, et des extractions naturelles d'air en façade traversantes et /ou en patios et puits dépressionnaires de toiture (surface globale équivalente à celle des entrées, et insensibilité à la direction du vent, si une géométrie spécifique de l'ajutage de sortie en toiture est adoptée) d'autre part.

- L'architecture interne soit débitante, afin de permettre un transite libre et une fluidité des écoulements : absence d'obstacles, de cloisons perpendiculaires aux flux traversant, avec une surface de passage de l'air toujours supérieure à la transparence globale de celle de la plus petite porosité des deux façades opposées. Ces écoulements traversants doivent balayer plus précisément les couches de vie et zones de séjours.

Précisons aussi que l'efficacité d'une architecture climatique est dépendant de sa gestion :

- Les ouvrants sont à ouvertures progressives et ajustables (0 à 80%) pour des raisons de protection contre la pluie (ou d'alerte cyclonique), pour réduire les entrées (frein aux vitesses d'air trop élevées) lors de conditions de vent trop fort, mais surtout pour ajuster (débit, vitesse, distribution) les flux internes d'irrigation pour développer et contrôler le meilleur confort thermique de l'occupant.

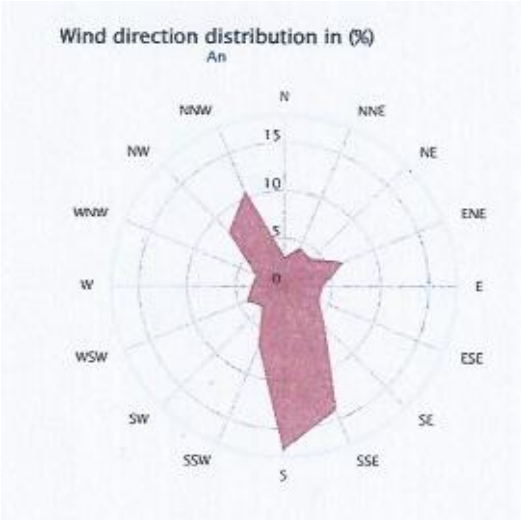
- La ventilation naturelle de nuit (-4°C minimum par rapport au jour en saison chaude) doit être systématiquement considéré pour décharger les masses thermiques et permettre par inertie le lendemain matin le rayonnement frais. Cette capacité d'échanges, d'accumulation et de restitution (rayonnement), avec déphasage (temps type de réponse des systèmes inertiels du bâtiment de 2 à 4 heures) , demande pour bien fonctionner des taux de renouvellement nocturnes moins élevés que ceux développés le jour (5 volumes /heure par exemple peuvent suffire) . Mais si l'on veut bénéficier du dispositif, il faudra « garder le frais nocturne » alors acquit (le minima extérieur est vers 4h du matin) et fermer alors tous les ouvrants au lever du jour (température intérieure inferieure à la température extérieure). Lorsqu'en cours de matinée la température intérieure atteindra les 26°C (thermomètre), il faudra alors re-ouvrir les baies et jalousies pour que les écoulements naturels traversant (débitant) développent par convection forcée une baisse de température ressentie.

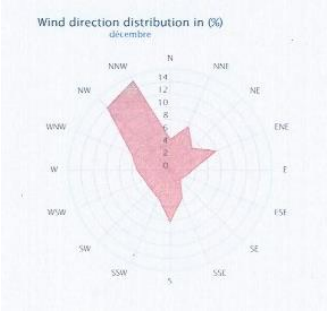
2- Application au travail de conception théorique du Collège Boueni

Les réflexions, le travail de conception et les développements aéro-climatiques (ventilation naturelle) du Projet dont été réalisées courant 2014 avec l'équipe de Maîtrise d'œuvre A.Perrau et M. Raynaud, LEU Réunion, et JGC.

L'analyse climatique du site donne une bonne potentialité de ventilation, puisque le recalage climatique par rapport à la station de météorologique de DZAOUDZI conduit à une fréquence de 69% du temps où la vitesse des flux dépasse 2 .5m/s à 10 m de hauteur, avec une grande majorité

des flux orientés du Sud Est au Sud Ouest (par le Sud) , mais <u>l'été</u> il existe des vents ou brises du Nord Ouest et du Nord Est qui sont déterminants.





Distribution annuelle ***Décembre*** ***Janvier***

Il a pu alors être construit une stratégie d'architecture bioclimatique, avec une conception thermique optimisée du bâti et une architecture à fort développement en ventilation naturelle:

- Le plan masse et les espaces intermédiaires :

Le plan masse se veut aussi « respirant» que possible. Il est disposé suivant «trois marches » sur la pentes pour être totalement ouvert (sans masques) aux vents (dont les brises marines) de l'Ouest à l'Est par le Sud .

La marche haute reçoit les unités bâtis de salles de cours (niveaux R+1 et R+2), implantés plutôt suivant une ligne (axe Est Ouest) de niveau. Des larges brèches et des espaces intermédiaires libres sont aménagés entre et autour des modules, et certaines unîtes présentent des transparences de rez de chaussée. et d'autres sont sur pilotis (logements).

Une deuxième marche intermédiaire (niveau inferieur) reçoit la Restauration.

La marche basse reçoit le bâtiment central de l'Accueil et l'Administration, et à l'extrémité Ouest des logements dégagés du sol par des pilotis.

Cette organisation, qui utilise la topographie (pente nord Sud), donne au plan masse caractère tridimensionnelle favorable aux brassages des flux, et réduit les effets de sillage. En outre, compte tenue de la création des larges espaces intermédiaires végetalisés et arborés et de l'environnement immédiat végétal du terrain, les effets bénéfiques (rayonnement, inertie, absorption, évaporation, protection solaires, filtre, etc.) des interactions « bâti – végétation » sont largement favorisés, et vont contribuer à la qualité climatique et l'ambiance thermique du Collège.

Les données statistiques donnent comme orientations de directions des flux les plus marqués du Sud Est au Sud Ouest (par le Sud), mais l'été les flux du Nord Est et du Nord Ouest sont très présents. En conséquence l'orientation des modules bâtis linéaires a été organisée de façon à ce que leurs façades perméables soient perpendiculairement à l'axe Nord –Sud afin de développer, entre façades opposées, la meilleure potentialité de ventilation traversante.

- Une architecture aérothermique:

Les constructions de type « Salles de cours » (D-E-F-G-H) sont définies en trame mince (épaisseur<7m), avec des porosités de façades de 40% à 65% , et sont perpendiculaires aux flux irrigant le site. Compte tenue de l'effet de déclivité, pour augmenter le « captage » des flux à l'admission (vents des secteurs autour du Sud) et pour un développer la « dépression à l'extraction » (vents de secteurs autour du Nord), les mono-pentes des toits ont été inversées par rapport à la pente naturelle du terrain.

Le bâtiment Accueil et Administration en implantation centrale basse sur le terrain présente trois niveaux, cape bien les flux de secteurs Sud, mais se trouve sous effets de sillages et de masques pour les vents de secteurs Nord. Une architecture climatique spécifique a alors été élaborée autour d'un espace patio central, de large dimension, pour former un puits dépressionnaire d'extraction, efficace quelque soit la direction des vents. L'émergence du patio au dessus de la toiture terrasse a été portée à un niveau supplémentaire (3m) pour pouvoir se dégager des interactions aérodynamiques immédiates. Les façades des différents niveaux, et celles débouchant sur le puits-patio ont des perméabilités dépassant largement les 50% avec une répartition homogènes et reparties sur l'ensemble des périmètres. Les écoulements dynamiques de ventilation s'instaurent toujours (et pour tous les vents) de la façade extérieure d'entrée, transites dans l'espace de vie et les ventile, puis sortent par le patio central. Les écrans pare-soleil, en aubes verticales, sont décalés par rapport aux plans des façades afin de ne pas réduire la porosité aérodynamique des façades.

Le Bâtiment Restaurant en marche intermédiaire, avec une problématique forte d'effets de masque et d'interactions aérodynamiques avec le bâtiment D, présente une architecture dessinée autour d'un « patio central ». Mais pour assurer l'extraction naturelle (dépression) par le puits central il aurait fallu construire une cheminée émergente au dessus du faîtage du bâtiment D, ce qui n'a pas de sens pratique. Le concept novateur est de créer artificiellement une dépression dans le patio par la mise en place de trois ventilateurs à vitesses variable (grand diamètre, un tour seconde, puissance faible : type Power fan industriel) qui assent un débit d'extraction piloté (débit maximum : 2,5 m/s x surface du patio). Les façades, et celles débouchant sur le patio à extraction assistée, ont des perméabilités dépassant largement les 50% avec une répartition homogènes et reparties sur l'ensemble des périmètres.

- Implantation systématique de brasseur d'air

En complément de la gestion appropriée des ouvrants et de la mise en œuvre d'une ventilation de nuit, et afin d'affiner le contrôle et l'optimisation du confort thermique, il est implanté dans tous les espaces en ventilation naturelle des brasseurs d'air (vitesse variable - diamètre 1.5m – un brasseur par 15m2).

3- Quantification de l'efficacité en ventilation naturelle par simulation physique (maquette en soufflerie) au Laboratoire Aérodynamique Eiffel

Le présent rapport d'étude En-15-104 explicite toute la démarche de cette simulation (voir les chapitres précédent), expose et analyse les mesures de champs de vitesses de ventilation, et

quantifie l'efficacité de la conception aérodynamique en ventilation naturelle (et naturelle assistée) du futur Collège Boueni.

Les résultats sont édifiants :Dès qu'un vent de 2.5m/s existe sur le site les champs de vitesses d'irrigation interne se positionnent (en potentiel) de vitesses moyennes :

- entre 0.5m/s et 2m/s pour les Salles de cours,

- entre 0.35 m/s et 2 m/s pour le Bâtiment Accueil et Administration,

- entre 0.45 m/s et 1.35 pour le Bâtiment Restauration (ventilation de patio assistée) .

Globalement la conception aérodynamique est efficace et sûr.

On peut remarquer qu'une amélioration est possible pour l'aile en extrémité Ouest (points 43-35-36) du bâtiment A, cette dernière étant relativement un peu moins ventilée que le reste. On peut préconiser alors en mesure complémentaire sur cette partie une écope linéaire, ouvertes vers le Nord (pente 45°, inversée au sens de la pente du toit, et hauteur d'ouverture de bouche d'écope de 1.2m).

4- Synthèse

Le Collège dans sa conception bioclimatique et aéro thermique développe une ventilation des espaces de vie performante en assurant 69 % du temps une température ressentie de plusieurs degrés inferieurs à la température extérieure (sous abri solaire). Dans ces conditions le confort thermique est alors pleinement atteint.

Lorsque le vent tombe (inferieur à 2m/s), et compte tenue de l'excellent parti pris aérodynamique des niveaux porosités de façade (supérieure à 50%) et des puits d'extractions (naturel ou assisté), les taux de renouvellement d'air minimum nécessaires à l'évacuation des charges thermiques de fonctionnement seront assurés (système de siphonage toujours existant avec des vitesses d'entrées et de sorties de 0.1 m/s minimum , même par temps calme) .Dans ces conditions le confort thermique sera atteint par la mise en marche des brasseurs d'air .

L'interaction du Collège avec son environnement vert et ses espaces intermédiaires végétaux contribuera aussi à un baissement de température ambiante (physique) de un deux degrés notamment au niveau du sol et des rez de chaussées.

Rappelons enfin qu'il y aura toujours fort à gagner (abaissement inertiel de la température intérieure) en jouant systématiquement avec la ventilation naturelle de nuit des espaces, en l'associant à une gestion de bon sens des ouvertures et baies des façades (voir « ventilation de nuit » -§1) .

ANNEXE 9 chapitre 3

STD collège Bouéni

PARTIE 4

PERFORMANCE CONFORT, ENERGIE ET ENVIRONNEMENT

Confort thermique – Simulation Thermique Dynamique

Afin d'évaluer le confort thermique à l'intérieur du projet de construction, nous avons réalisés une étude via un logiciel de simulation thermique, nommé EnergyPlus. En modélisant le bâtiment, les caractéristiques techniques et l'environnement, nous pouvons évaluer le comportement thermique à l'intérieur de certains locaux.

Les résultats de cette étude permettront d'obtenir les débits volumiques moyens, les températures opératives et le pourcentage de confort à l'intérieur des locaux.

Adaptation du diagramme de confort à Mayotte

Définition du confort :

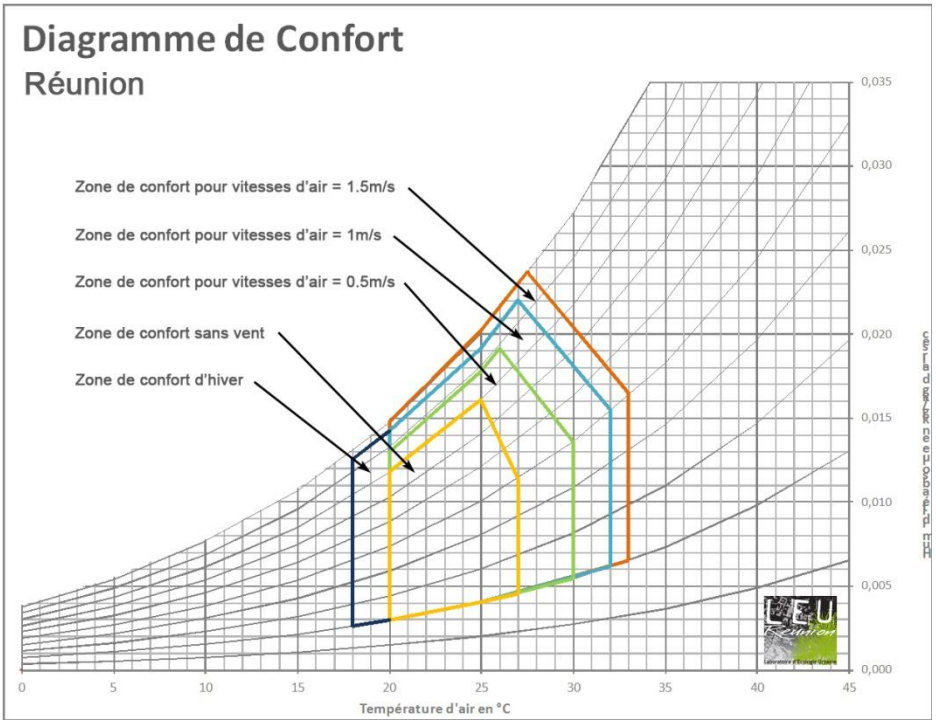
On parle de confort hygrothermique lorsque l'on est en état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il va dépendre de plusieurs facteurs dont :

- Vitesse d'air : Elle influence par convection sur les échanges thermiques. Ainsi, lorsqu'on a une ventilation supérieure à 0,2 m/s, la vitesse d'air va influencer le confort. Par exemple, quand on allume un ventilateur en période chaude, cette vitesse d'air va améliorer le confort thermique alors que la température de l'air reste identique ; on parle alors de température ressentie.

- Humidité : Entre 30 et 70%, l'humidité relative va peu jouer sur le confort thermique. Or, les taux moyens d'humidité sont de l'ordre de 80% à Mayotte. On veillera à ne pas laisser stagner l'air dans les locaux pour éviter toute forme de condensation, on ventilera alors un maximum.

- Température des parois : Elle influence les échanges thermiques par rayonnement. Par exemple, si l'on se place en dessous d'une tôle classique, la sensation de chaleur sera plus conséquente que sous une tôle Ondulit, précédemment évoquée, qui réfléchira 90% du rayonnement et qui a une couche mince d'isolation.

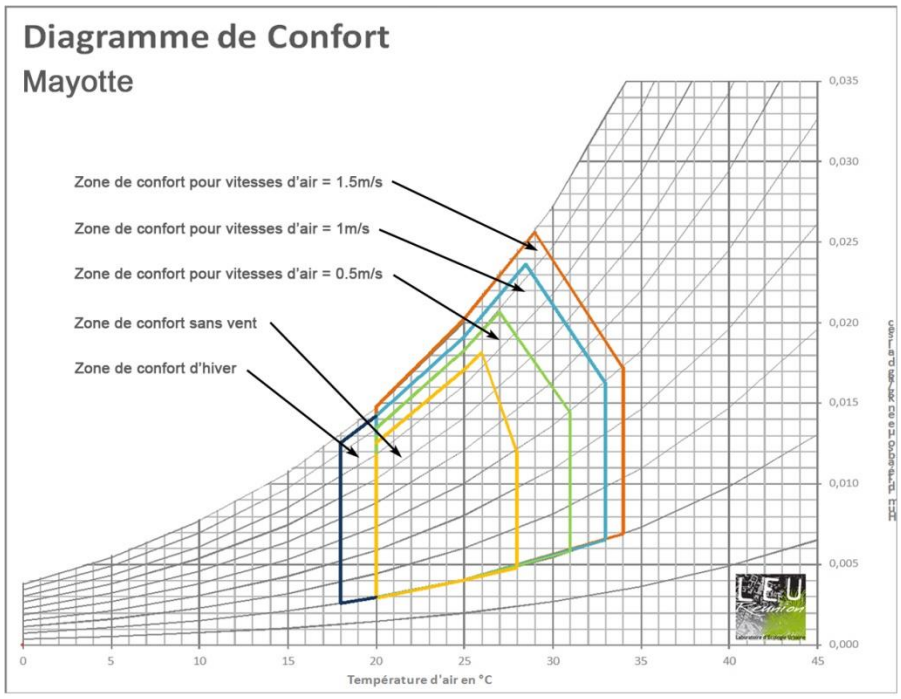
- Température de l'air : La température de l'air ambiant va bien évidemment influencer le confort thermique. En période chaude, la température de l'air ambiant pourra être supérieure à 30°C, il faudra alors évacuer cette charge thermique.



On peut évaluer le confort grâce au diagramme de confort qui est fonction de la température de l'air, de l'humidité et des vitesses de vents. Si l'on est situé dans le carré jaune, on est en situation de confort pour des vitesses d'air quasi-nulles. Si l'on est dans le carré vert, on est en situation de confort pour des vitesses d'air comprises entre 0,5 et 1 m/s. Lorsqu'on est dans le carré bleu, on est en situation de confort pour des vitesses d'air supérieures à 1 m/s. Enfin, le carré orange exprime la situation de confort pour des vitesses d'air supérieures à 1,5 m/s. Lors des études du confort hygrothermique dans les phases suivantes, nous exprimerons le confort grâce à ce diagramme.

Adaptation du diagramme de confort

A la Réunion, les conditions climatiques sont plus favorables comparés à Mayotte. Après discussion avec la population locale, nous avons pu constater une différence de perception entre le confort ressenti à Mayotte par rapport à la Réunion. En effet, la population de Mayotte souffre moins des fortes chaleurs. Nous avons donc redéfinis les zones de confort pour les adapter au ressenti de la population locale.



Les zones du diagramme du confort de Mayotte ont donc été agrandies de 1°C par rapport aux zones de confort de la Réunion.

Fichier météorologique utilisé

Le fichier météorologique utilisé est celui fourni par Mayenergie.

	Pourcentage dans la zone de confort pour v=0m/s (%)	**Pourcentage dans la zone de confort pour v=0,5m/s (%)**	**Pourcentage dans la zone de confort pour v=1m/s (%)**	**Pourcentage dans la zone de confort pour v=1,5m/s (%)**	**Nombre d'heures où la température >28°C**	**Nombre d'heures où la température >30°C**	**Nombre d'heures où la température >32°C**	**Nombre d'heures où la température >33°C**
Toute l'année 0h-23h	31	68	97	100	1683	366	0	0
Occupation scolaire 7h-18h	22	55	95	100	1130	236	0	0

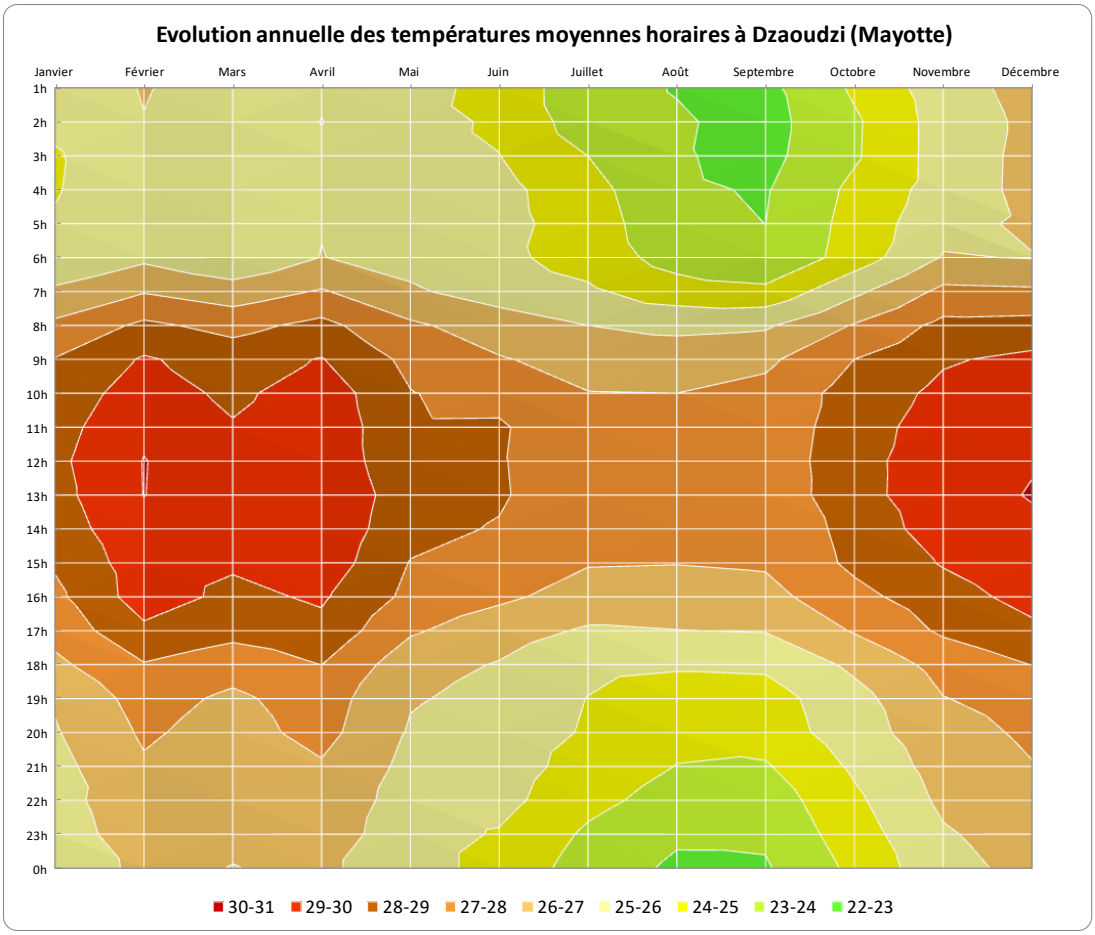


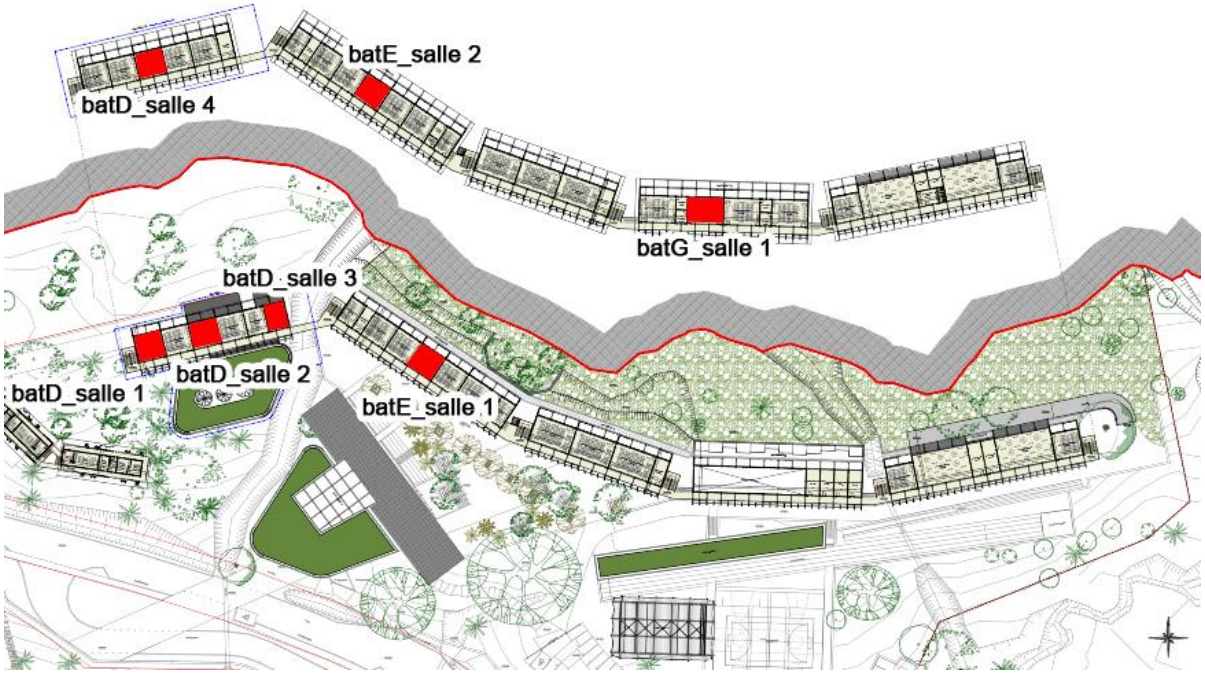
Figure 8 : Evolution annuelle des températures moyennes horaires (°C), source : Mayenergie

Commentaires : On note qu'à l'extérieur, les données météorologiques nous donnent un taux d'inconfort de 12% sur l'année pendant la période d'occupation des locaux (7h-18h) pour des vitesses d'air supérieures ou égales à 1m/s sur le corps et de 4% pour des vitesses d'air supérieures ou égales à 1,5m/s.

Bâtiment D, E, F, G et H

Les locaux étudiés ici sont les bâtiments D, E, F, G et H qui correspondent aux salles de cours principalement. Nous avons choisi les locaux les plus défavorables d'un point de vue thermique étant situé au niveau inférieur (moins bon potentiel de ventilation naturelle) et sur des pignons (contact avec l'extérieur d'une façade supplémentaire).

Les locaux étudiés sont les suivants :



4.1.2.1. Caractéristiques techniques des locaux étudiés

Les caractéristiques techniques des locaux sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Caractéristiques d'une salle banalisée			
Typologie de structure	Légère		
Sol / Plafond (Cofradal)	Béton	Conductivité	1,65 W/m.K
		Densité	2100 kg/m3
		Capacité thermique massique	880 J/kg.K
		Epaisseur	70 mm
	Laine de roche	Conductivité	0,04 W/m.K
		Densité	50 kg/m3
		Capacité thermique massique	900 J/kg.K
		Epaisseur	128 mm
Plafond sous toiture	Tôle Ondulit	Conductivité	100 W/m.K
		Densité	2800 kg/m3
		Capacité thermique massique	880 J/kg.K
		Epaisseur	5 mm
	Fibralith	Conductivité	0,04 W/m.K
		Densité	19,5 kg/m3
		Capacité thermique massique	900 J/kg.K
		Epaisseur	50 mm
Paroi verticale intérieure	Cloison Placoplatre	Conductivité	0,25 W/m.K
		Densité	800 kg/m3
		Capacité thermique massique	1100 J/kg.K
		Epaisseur	120 mm
	Laine de roche	Conductivité	0,04 W/m.K
		Densité	50 kg/m3
		Capacité thermique massique	900 J/kg.K
		Epaisseur	60 mm
Paroi verticale extérieure	Laine de roche	Conductivité	0,04 W/m.K

		Densité	50 kg/m3
		Capacité thermique massique	900 J/kg.K
		Epaisseur	60 mm
	Deux Panneaux Reynobond (intérieure et extérieure)	Conductivité	0,29 W/m.K
		Densité	1500 kg/m3
		Capacité thermique massique	897 J/kg.K
		Epaisseur	4 mm
Vitrage au Sud	Vitrage clair	Transmission lumineuse	90%
		Facteur solaire	87%
Vitrage au Nord	Polycarbonate transparent	Transmission lumineuse	83%
		Facteur solaire	86%
Menuiserie	Jalousie 0,89*1,90	Coefficient de menuiserie	0.8
		Gestion : Ouverture toute l'année durant les périodes d'occupation, à savoir 8h-18h en occupation.	
	Stores 3,56*2	Coefficient de menuiserie	1
		Gestion : Ouverture toute l'année durant les périodes d'occupation, à savoir 7h-18h en occupation.	

4.1.2.2. Apports internes

Toutes les données concernant les apports internes sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Apports internes			
Personnes	Nombre	25	Salle banalisée, Laboratoire
		13	Salle demi-groupe
	Chaleur latente par personne	50 W	
	Chaleur sensible par personne	70 W	
	Planning d'occupation	Jour	lundi au vendredi hors jours fériés / vacances
		Horaire	7h-12h : 100%
			12-13h : 0%
			13-18h : 100%
Equipements informatiques	Nombre	1	Salle banalisée, Laboratoire
		25	Salle informatique

	Puissance dégagée par poste	100 W	
	Planning	Jour	lundi au vendredi hors jours fériés / vacances
		Horaire	7h-12h : 100%
			12-13h : 20%
			13-18h : 100%
Eclairage	Densité par local	8 W/m²	
	Planning	Jour	lundi au vendredi hors jours fériés / vacances
		Horaire	7h-8h : 100%
			8h-16h : 0%
			17h-18h : 100%

Vacances scolaires :

19 décembre au 15 janvier

02 mars au 17 mars

01 mai au 12 mai

7 juillet au 21 août

08 octobre au 21 octobre

Jours fériés hors calendrier scolaire :

1 et 11 novembre

1 et 27 avril

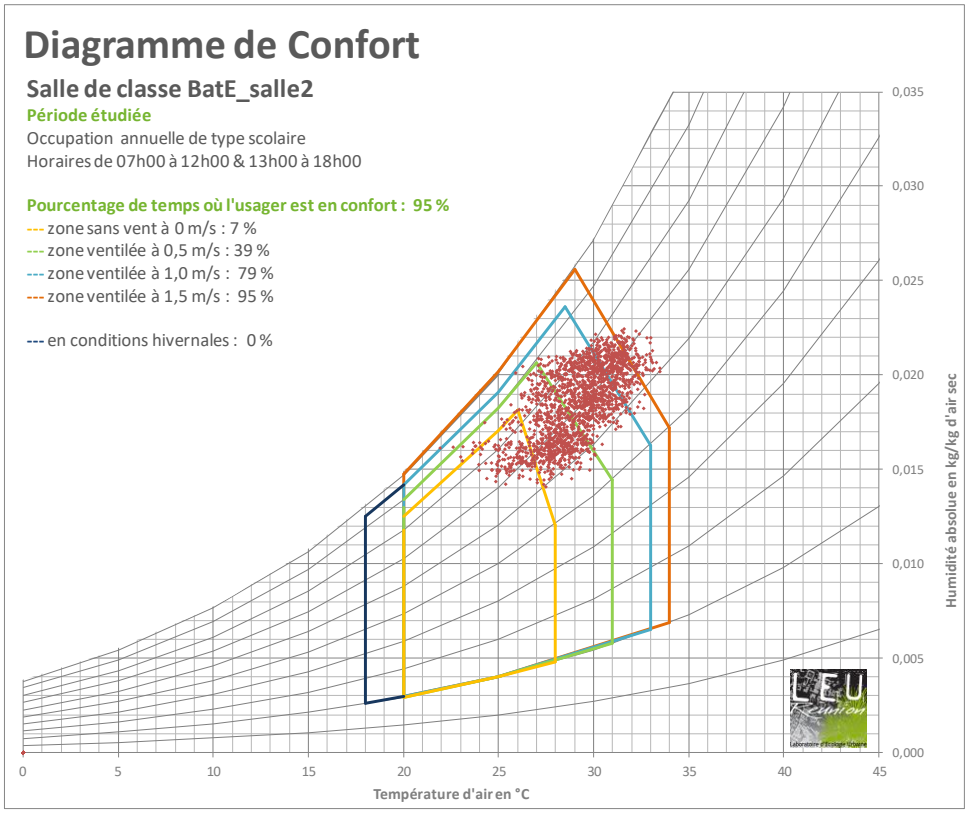
31 mars

8, 9, 19 et 20 mai

4.1.2.3. Résultats & Analyse

Après avoir entré tous les paramètres et caractéristiques du bâtiment, nous réalisons le calcul à proprement parlé qui nous donne les résultats suivants :

	Pourcentage hors zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage hors zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
BatD_salle1	71	88	1445	76,4	786	41,5	183	9,7
BatD_salle2	78	96	1376	72,7	641	33,9	64	3,4
BatD_salle3	79	96	1366	72,2	631	33,4	62	3,3
BatD_salle4	84	98	1282	67,8	541	28,6	41	2,2
BatE_salle1	79	95	1394	73,7	646	34,1	71	3,8
BatE_salle2	83	98	1303	68,9	572	30,2	41	2,2
BatG_salle1	77	94	1366	72,2	659	34,8	85	4,5



Nota : Le nombre d'heures d'occupation total sur l'année est de 1892h.

Commentaires :

Les résultats montrent que les salles de classe étudiées ont de bons niveaux de confort hygrothermique (>94% du temps d'occupation) avec des vitesses d'air supérieures à 1.5m/s sauf pour la salle de classe BatD_salle1 qui n'a que 88% d'heures situés dans la zone de confort « orange ». Nous reviendrons dans les variantes sur les travaux d'optimisation thermique de cette salle de classe.

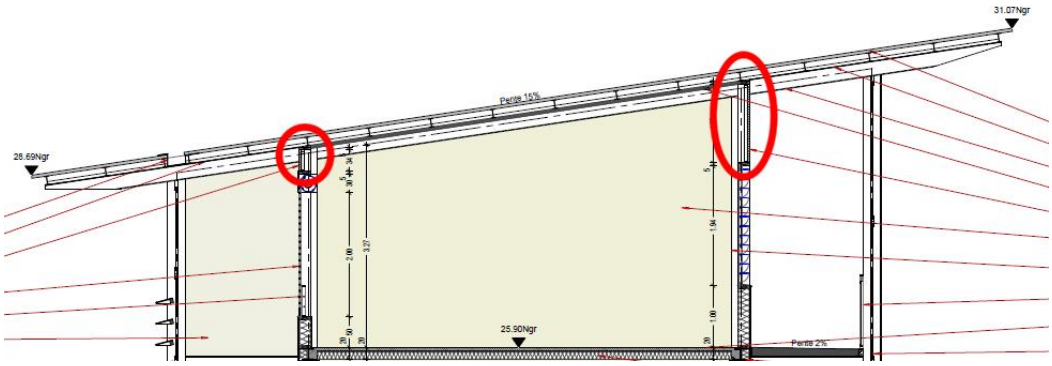
Le nombre maximal (hors salle de classe BatD_salle1) d'heures où la température est supérieure à 32°C est de 85h pour la salle BatG_salle1, ce qui représente 4,5% du temps d'occupation. Dans les autres salles, il y a seulement entre 2 et 4% de température supérieure à 32°C.

Globalement, le confort hygrothermique est atteint dans la majorité des salles de classe à condition que les salles de classes soient débitante avec des vitesses d'air élevées pour le confort des usagers.

Testons maintenant certaines dispositions pour améliorer le confort au sein de ces locaux.

4.1.2.5. Variante 1 : Ventilation nocturne des salles de classe – Mise en place de lame Z

Un test sur la mise en place de lame Z en partie haute des salles de classe situées sous toiture a été testé. Ceci permet de ventiler naturellement ces salles de classe la nuit. A noter que les salles où sont installés ces dispositifs ont déjà des taux de confort satisfaisant.



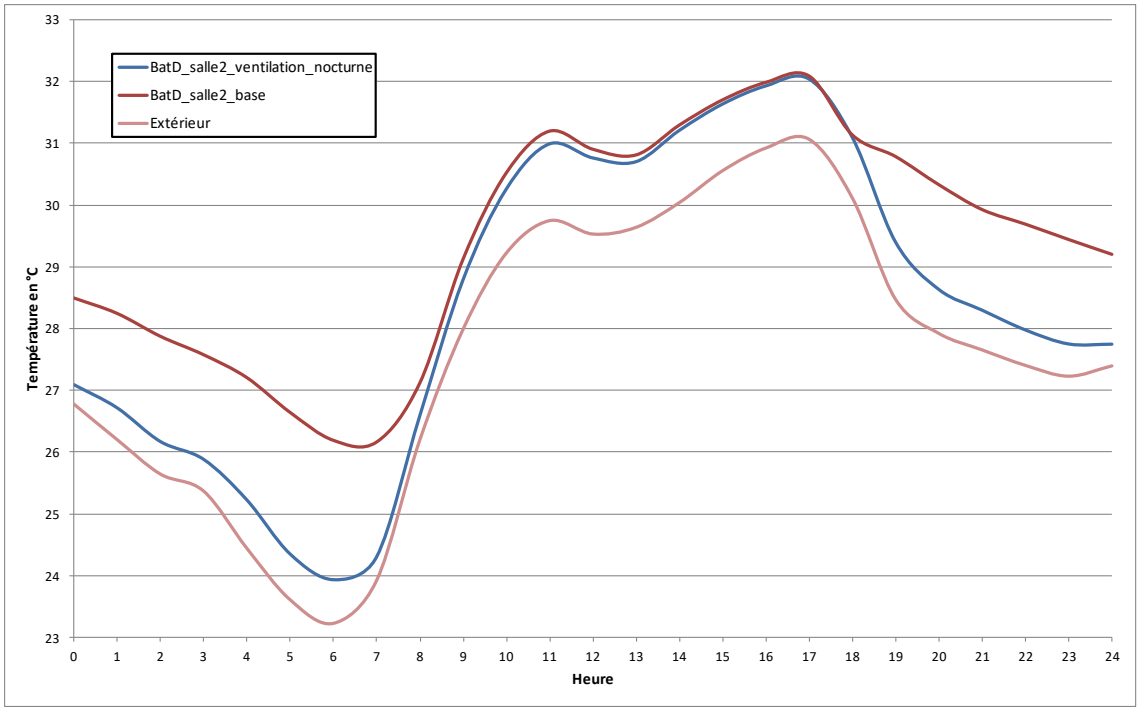
	Pourcentage hors zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage hors zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
BatD_salle4	84	98	1267	67,0	534	28,2	37	2,0
BatE_salle2	84	99	1264	66,8	522	27,6	34	1,8
BatG_salle1	78	95	1346	71,1	620	32,8	73	3,9
Différence avec le cas de base								
BatD_salle4	0	0	-15	-0,8	-7	-0,4	-4	-0,2
BatE_salle2	1	1	-39	-2,1	-50	-2,6	-7	-0,4
BatG_salle1	1	1	-20	-1,1	-39	-2,1	-12	-0,6

On observe une amélioration par rapport au cas de base. Cette disposition permet de réduire jusqu'à 50 heures le nombre d'heures supérieures à 30°C dans la salle batE_salle2. Ceci est dû à un meilleur relargage des calories la nuit, même si les différences de température entre la journée et la nuit sont faibles.

4.1.2.6. Variante 2 : Ventilation nocturne de toutes les salles de classe

Un test en laissant un coefficient d'ouverture fixe de 10% par rapport aux surfaces ouvrables est réalisé. Ainsi, un flux débitant d'air va permettre d'évacuer les surcharges thermiques

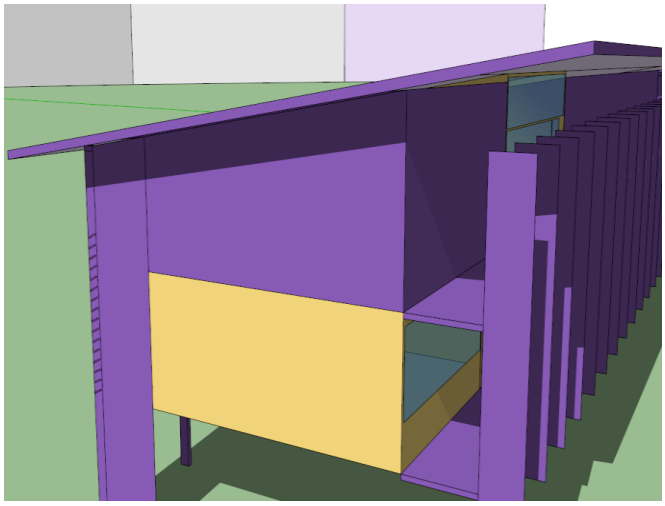
	Pourcentage hors zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage hors zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
BatD_salle1	71	88	1406	74,3	765	40,4	175	9,2
BatD_salle2	79	96	1325	70,0	598	31,6	59	3,1
BatD_salle3	80	96	1321	69,8	596	31,5	60	3,2
BatD_salle4	84	98	1246	65,9	511	27,0	36	1,9
BatE_salle1	80	96	1346	71,1	608	32,1	66	3,5
BatE_salle2	85	99	1239	65,5	506	26,7	34	1,8
BatG_salle1	79	96	1315	69,5	596	31,5	68	3,6
Différence avec le cas de base								
BatD_salle1	0	0	-39	-2,1	-21	-1,1	-8	-0,4
BatD_salle2	1	0	-51	-2,7	-43	-2,3	-5	-0,3
BatD_salle3	1	0	-45	-2,4	-35	-1,8	-2	-0,1
BatD_salle4	0	0	-36	-1,9	-30	-1,6	-5	-0,3
BatE_salle1	1	1	-48	-2,5	-38	-2,0	-5	-0,3
BatE_salle2	2	1	-64	-3,4	-66	-3,5	-7	-0,4
BatG_salle1	2	2	-51	-2,7	-63	-3,3	-17	-0,9



Le fait de ventiler la nuit va améliorer efficacement le confort thermique au sein du bâti. On aura une légère amélioration du confort global avec une augmentation de 2% du confort dans les salles BatE_salle2 et BatG_salle1. En analysant plus en détail les courbes de températures, on constate bien que le bâtiment va se décharger de ces calories la nuit et se rapprocher des températures extérieures. Cependant, au matin, les courbes de températures intérieures vont rapidement monter comme nous l'avons vu précédemment. On observe quand même une différence de 0,1 à 0,5°C d'écart entre le cas de base et la ventilation nocturne. On aura un fort écart au matin, puis au fur à mesure de la journée, les salles de classe vont se charger et les différences entre les deux cas seront alors minimes.

4.1.2.7. Variante 3 : Optimisation thermique de la salle BatD_salle1 – Vitrage réfléchissant

Cette salle, située sur le pignon Ouest du bâtiment D est moins bonne d'un point de vue thermique car la façade Sud va recevoir du rayonnement solaire direct en milieu/fin de journée. En effet, il n'y a pas à l'heure actuelle de protection solaire verticale ou autres dispositifs permettant de protéger cette façade, comme nous pouvons le constater sur l'image ci-dessous montrant l'ombrage au 1er décembre à 15h. L'escalier étant situé juste à côté, il est impossible de fermer le bout du bâtiment par une protection verticale.



Salle BatD_salle1, ombrage des façades le 1er décembre à 15h

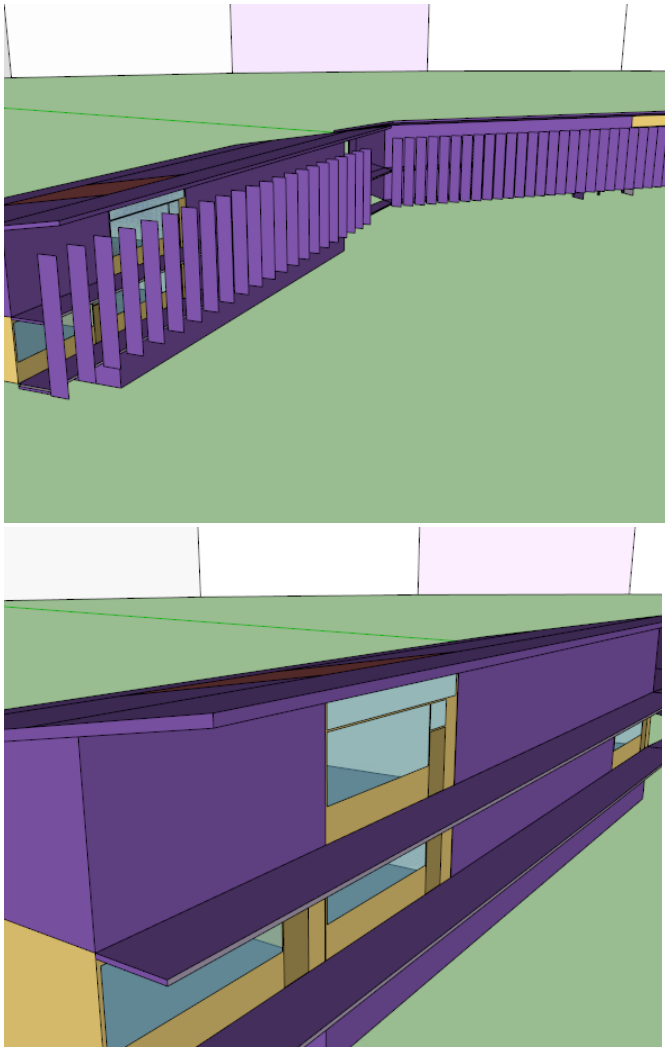
Une optimisation sur la nature du vitrage a été testée pour constater la performance des vitrages traités. Le facteur solaire du vitrage est de 0,83 ; ici nous changerons cette valeur pour avoir un vitrage réfléchissant type Sunreflec bronze avec un facteur solaire de 0,3.

	Pourcentage hors zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage hors zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
BatD_salle1	74	92	1412	74,6	723	38,2	113	6,0
Différence avec le cas de base								
BatD_salle1	3	4	-33	-1,7	-63	-3,3	-70	-3,7

On constate que placer du vitrage réfléchissant à la place du vitrage clair permet d'augmenter considérablement le confort au sein de cette pièce. En effet, on arrive à une augmentation de près de 4% pour des vitesses d'air supérieures à 1.5 m/s et un abaissement de 70 heures où la température est supérieure à 32°C.

4.1.2.8. Variante 4 : Impact des protections solaires en façade Sud

Pour se rendre compte de l'impact de protections solaires situées en façade Sud, un test en enlevant ces dispositifs a été réalisé.



Protection solaire installée (à gauche) / Suppression des protections solaires (à droite)

	Pourcentage hors zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage hors zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
BatD_salle1	68	85	1480	78,2	852	45,0	226	11,9
BatD_salle2	73	92	1428	75,5	726	38,4	106	5,6
BatD_salle3	75	93	1394	73,7	690	36,5	90	4,8
BatD_salle4	80	97	1337	70,7	593	31,3	60	3,2
BatE_salle1	68	86	1495	79,0	831	43,9	209	11,0

BatE_salle2	74	92	1404	74,2	716	37,8	115	6,1
BatG_salle1	73	91	1411	74,6	727	38,4	123	6,5
Différence avec le cas de base								
BatD_salle1	-3	-3	35	1,8	66	3,5	43	2,3
BatD_salle2	-5	-4	52	2,7	85	4,5	42	2,2
BatD_salle3	-4	-3	28	1,5	59	3,1	28	1,5
BatD_salle4	-4	-1	55	2,9	52	2,7	19	1,0
BatE_salle1	-11	-9	101	5,3	185	9,8	138	7,3
BatE_salle2	-9	-6	101	5,3	144	7,6	74	3,9
BatG_salle1	-4	-3	45	2,4	68	3,6	38	2,0

L’influence des protections solaires des façades Sud sur le confort dans les salles de classe est très importante. On note une diminution de 10% du confort environ dans la salle BatE_salle1 ! Ces dispositifs sont donc indispensables pour le confort des élèves et professeurs de cet établissement.

4.1.2.9. Conclusion

Tout au long de cette étude, un travail d'optimisation fin a été réalisé pour améliorer le confort des usagers du collège Boueni. Une réflexion sur les protections solaires des façades Sud et Nord a été engagé dès le départ. Ce dimensionnement a permis de limiter l'impact du rayonnement direct sur les façades, ce qui est la première condition pour atteindre le confort. La seconde est le caractère débitant des locaux qui par une conception poreuse avec une trame fine de bâtiments (7m), permet d'évacuer efficacement les calories emmagasinés tout au long de la journée.

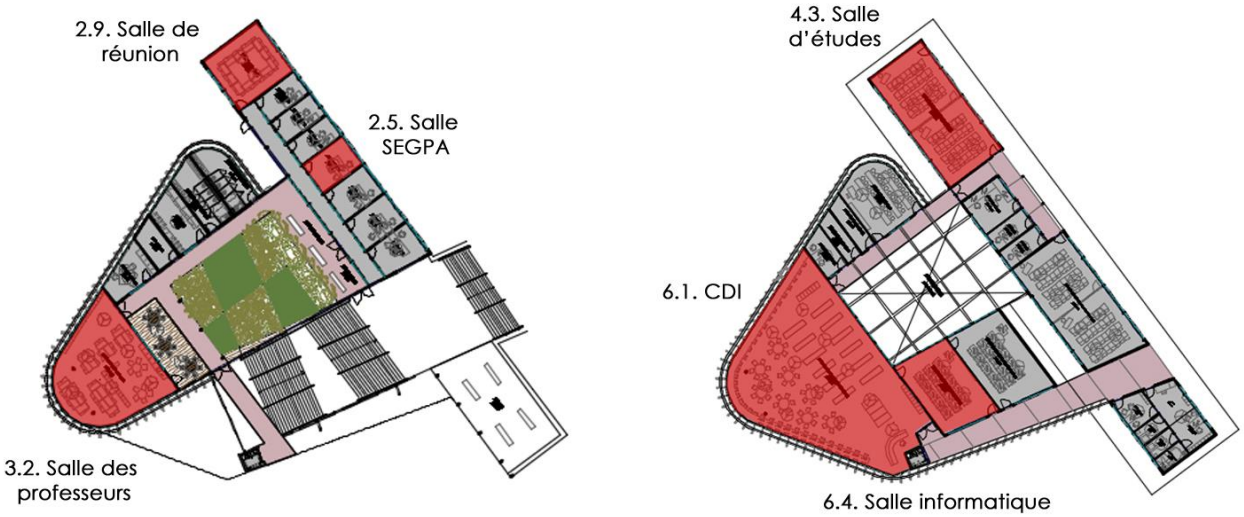
Fort de cette réflexion, nous avons testé le bâtiment et ajusté certains détails (inclinaison des protections solaires, fermeture des pignons, etc.) pour l'améliorer sans nuire à la qualité architecturale du projet. Les résultats nous montrent que les niveaux de confort sont satisfaisants si des vitesses d'air sont crées à l'intérieur des locaux. Ces vitesses d'air peuvent être générées naturellement lorsqu'il y a du vent ou par des brasseurs d'air performants. Aujourd'hui, quatre brasseurs d'air sont présents dans les salles de classe de 50m² et six pour celles de 75m².

De plus, nous avons constatés que la ventilation nocturne a un impact certain sur l'évacuation des calories des locaux. Cette solution sera étudiée en phase suivante. La mise en place d'un vitrage réfléchissant pour la salle BatD_salle1 est également une solution permettant d'améliorer efficacement le confort des usagers de cette pièce.

Bâtiment A

Les locaux étudiés ici font partie du bâtiment A regroupant le pôle administration, médiathèque, salle des professeurs et quelques salles de permanence. La salle de restauration située dans le bâtiment D est également étudiée à cette phase d'étude.

Les locaux étudiés sont les suivants :



Salles étudiées dans le bâtiment A - niveau 16 (gauche) / niveau 19.5 (droite)

4.1.4.1. Caractéristiques techniques des locaux étudiés

Les caractéristiques techniques des locaux situés au rez-de-chaussée sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Caractéristiques des salles étudiées			
Typologie de structure	Légère		
Sol / Plafond (Cofradal)	Béton	Conductivité	1,65 W/m.K
		Densité	2100 kg/m3
		Capacité thermique massique	880 J/kg.K
		Epaisseur	70 mm
	Laine de roche	Conductivité	0,04 W/m.K
		Densité	50 kg/m3
		Capacité thermique massique	900 J/kg.K
		Epaisseur	128 mm
Toiture		Conductivité	100 W/m.K

	Tôle Ondulit + lame d'air + fibralith (salle 2.5 / 2.9 / 4.3)	Densité	2800 kg/m3
		Capacité thermique massique	880 J/kg.K
		Epaisseur	5 mm
	Toiture terrasse auto-protégée (bac acier + isolation + étanchéité)	Conductivité	1,65 W/m.K
		Densité	2100 kg/m3
		Capacité thermique massique	880 J/kg.K
		Epaisseur	70 mm
Paroi verticale intérieure	Cloison Placoplatre	Conductivité	0,25 W/m.K
		Densité	800 kg/m3
		Capacité thermique massique	1100 J/kg.K
		Epaisseur	120 mm
		Conductivité	0,04 W/m.K
		Densité	50 kg/m3
		Capacité thermique massique	900 J/kg.K
		Epaisseur	60 mm
Paroi verticale extérieure	Laine de roche (seulement pour les murs rideaux côté coursive - règlementation feu)	Conductivité	0,04 W/m.K
		Densité	50 kg/m3
		Capacité thermique massique	900 J/kg.K
		Epaisseur	60 mm
	Deux Panneaux Reynobond (intérieure et extérieure)	Conductivité	0,29 W/m.K
		Densité	1500 kg/m3
		Capacité thermique massique	897 J/kg.K
		Epaisseur	4 mm
Vitrages	Vitrage clair	Transmission lumineuse	90%
		Facteur solaire	87%
Menuiserie	Jalousie	Coefficient de menuiserie	0.8
		Gestion : Ouverture toute l'année durant les périodes d'occupation, à savoir 8h-18h en occupation.	

4.1.4.2. Apports internes

Toutes les données concernant les apports internes sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Apports internes			
Personnes	Nombre	1	Salle 2.5
		20	Salle de réunion 2.9, Salle informatique
		30	Salle des professeurs 3.2
		40	Salle d'études 4.3
		50	CDI 6.1
	Chaleur latente par personne	50 W	
	Chaleur sensible par personne	70 W	
	Planning d'occupation	Jour	lundi au vendredi hors jours fériés / vacances
		Horaire	7h-12h : 100%
			12-13h : 0%
			13-18h : 100%
Equipements informatiques	Nombre	1	Salle banalisée, Laboratoire
		25	Salle informatique
	Puissance dégagée par poste	100 W	
	Planning	Jour	lundi au vendredi hors jours fériés / vacances
		Horaire	7h-12h : 100%
			12-13h : 10%
			13-18h : 100%
Eclairage	Densité par local	6 W/m²	
	Planning	Jour	lundi au vendredi hors jours fériés / vacances
		Horaire	7h-8h : 100%
			8h-16h : 0%
			17h-18h : 100%

Vacances scolaires :

19 décembre au 15 janvier

02 mars au 17 mars

01 mai au 12 mai

7 juillet au 21 août

08 octobre au 21 octobre

Jours fériés hors calendrier scolaire :

1 et 11 novembre

1 et 27 avril

31 mars

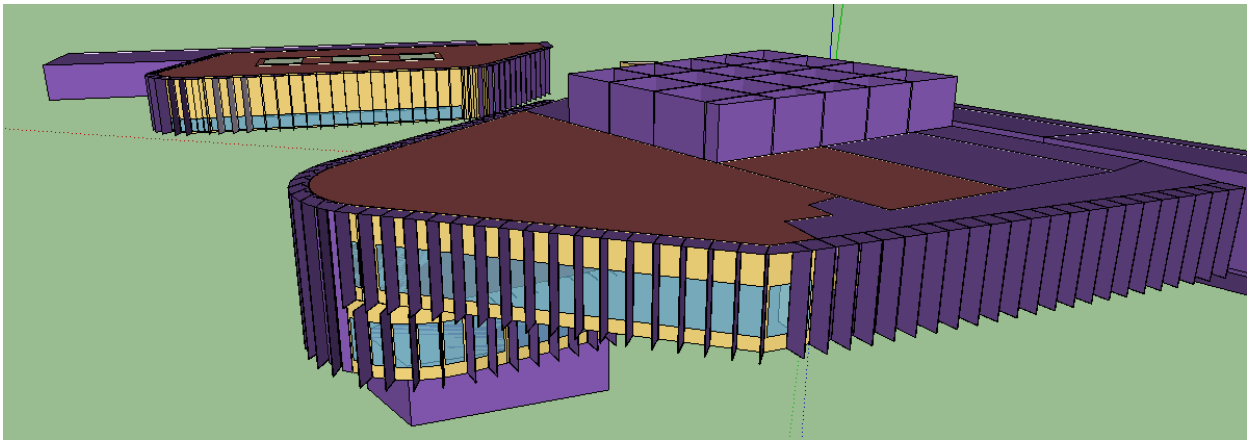
8, 9, 19 et 20 mai

4.1.4.4. Ventilation

Dans le cas de base, nous sommes partis sur des taux de renouvellement d'air de :

- 15 vol/h : salle 2.5 (SEGPA); salle des professeurs (3.2) ; salle informatique ; CDI (6.1)
- 60 vol/h : salle 2.9 (salle de réunion)
- 45 vol/h : salle 4.3 (salle d'études)

4.1.4.4. Résultats & Analyse



Après avoir entré tous les paramètres et caractéristiques du bâtiment, nous réalisons le calcul à proprement parlé qui nous donne les résultats suivants :

	Pourcentage zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
Salle 2.5	80	97	1452	76,7	614	32,5	53	2,8
Salle 2.9	72	94	1454	76,8	693	36,6	67	3,5
Salle 3.2	73	92	1374	72,6	639	33,8	83	4,4
Salle 4.3	71	93	1452	76,7	673	35,6	75	4,0
Salle 6.1	71	91	1377	72,8	657	34,7	99	5,2
Salle info	65	84	1525	80,6	864	45,7	272	14,4

Nota : Le nombre d’heures d’occupation total sur l’année est de 1892h.

Commentaires :

On constate que le confort thermique est atteint dans toutes les pièces sauf pour la salle informatique. En effet, les valeurs de température supérieure à 32°C sont de l’ordre de 75h sur toute l’année, ce qui représente environ 15 jours d’inconfort pour les élèves et professeurs.

Concernant la salle informatique, dans un fonctionnement en ventilation naturelle classique, le confort thermique ne sera pas atteint. En effet, il y a plus de 272h où la température est supérieure à 32°C, ce qui représente environ 40 jours d’inconfort. Dans la partie suivante, nous avons réfléchi à des dispositions permettant d’améliorer le confort pour les usagers de cette salle.

4.1.4.5. Variante 1 : Augmentation des taux de renouvellements d'air dans la salle informatique

Nous avons constatés que les performances thermiques sont moins bonnes dans la salle informatique, du fait de charges internes importantes. La mise en place d'une extraction plus importante par une CTA permettrait d'augmenter le taux de renouvellement d'air et donc le confort thermique au sein de cette salle. Deux tests ont été réalisés avec des taux de renouvellements d'air de 30 vol/h et de 50 vol/h au lieu de 15 vol/h par un fonctionnement en ventilation naturelle classique.

	Pourcentage zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
Salle info	69	89	1434	75,8	704	37,2	148	7,8
Différence avec le cas de base								
Salle info	4	5	-91	-4,8	-160	-8,5	-124	-6,6

Débit volumique de 30 vol/h

	Pourcentage zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
Salle info	72	91	1393	73,6	646	34,1	89	4,7
Différence avec le cas de base								
Salle info	7	7	-132	-7,0	-218	-11,5	-183	-9,7

Débit volumique de 50 vol/h

L'influence du taux de renouvellement d'air sur le comportement thermique de la salle informatique est importante. En effet, en doublant le taux de renouvellement d'air à 30 vol/h, on arrive à un confort amélioré d'environ 5% ! En augmentant encore ce débit de renouvellement d'air à 50 vol/h, les points situés dans la zone de confort seront augmentés de 7% par rapport à notre cas de base.

La CTA devra donc être en fonctionnement en période chaude dans la salle informatique pour améliorer l'évacuation des charges internes qui seront conséquentes dans cette salle (environ 3500W en continu).

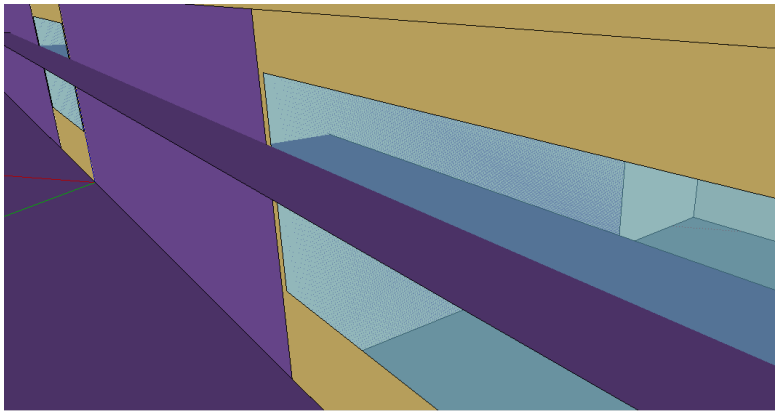
4.1.4.6. Variante 2 : Ventilation nocturne

Ce scénario est réalisé pour voir l'influence de la ventilation nocturne sur le comportement thermique du bâtiment A. Nous avons pris le fait que tous les ouvrants sont ouverts à 50% en période d'inoccupation.

	Pourcentage zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
Salle 2.5	80	97	1432	75,7	599	31,7	48	2,5
Salle 2.9	72	94	1448	76,5	684	36,2	64	3,4
Salle 3.2	73	92	1372	72,5	635	33,6	82	4,3
Salle 4.3	71	93	1445	76,4	666	35,2	72	3,8
Salle 6.1	72	91	1372	72,5	646	34,1	97	5,1
Salle info	65	84	1502	79,4	835	44,1	262	13,8
Différence avec le cas de base								
Salle 2.5	0	0	-20	-1,1	-15	-0,8	-5	-0,3
Salle 2.9	0	0	-6	-0,3	-9	-0,5	-3	-0,2
Salle 3.2	0	0	-2	-0,1	-4	-0,2	-1	-0,1
Salle 4.3	0	0	-7	-0,4	-7	-0,4	-3	-0,2
Salle 6.1	1	0	-5	-0,3	-11	-0,6	-2	-0,1
Salle info	0	0	-23	-1,2	-29	-1,5	-10	-0,5

On constate bien que ventiler la nuit permet d'évacuer les calories emmagasinés en journée. Le confort thermique sera donc amélioré mais ceci est tout de même relatif car il y a seulement quelques heures de surchauffes en moins. Ceci est dû essentiellement à la composition des parois qui a une faible inertie.

4.1.4.6. Variante 3 : Influence de l'étagère à lumière



Ici, nous avons testé l'impact de l'étagère à lumière sur le comportement thermique des salles 2.5 et 2.9. Comme nous l'avons placé dans le cas de base, nous l'avons retiré du modèle pour voir son influence.

	Pourcentage zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
Salle 2.5	73	94	1510	79,8	779	41,2	119	6,3
Salle 2.9	66	89	1486	78,5	833	44,0	126	6,7
Différence avec le cas de base								
Salle 2.5	-7	-3	58	156,6	165	73,6	66	9,1
Salle 2.9	-6	-5	32	155,4	140	80,7	59	10,2

L'usage de dispositif de protection solaire sur la façade Nord des salles 2.5 et 2.9 est primordial pour un bon comportement thermique du bâtiment. En effet, placer une protection solaire améliore en moyenne de 5% le confort global dans ces pièces.

Bâtiment D - restauration

Nous étudions ici la salle de restauration située dans le bâtiment D.

Bâtiment D - Salle de restauration

4.1.5.1. Caractéristiques techniques des locaux étudiés

Les caractéristiques techniques des locaux situés au rez-de-chaussée sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Caractéristiques des salles étudiées			
Typologie de structure	Légère		
Sol	Béton	Conductivité	1,65 W/m.K
		Densité	2100 kg/m3
		Capacité thermique massique	880 J/kg.K
		Epaisseur	70 mm
Plafond / Toiture	Toiture terrasse autoprotégée (bac acier + isolation + etanchéité)	Conductivité	0.04 W/m.K
		Densité	50 kg/m3
		Capacité thermique massique	900 J/kg.K
		Epaisseur	80 mm
Mur extérieur		Conductivité	0,29 W/m.K

	Panneau Reynobond + lame Z en partie basse (1.00)	Densité	1500 kg/m3
		Capacité thermique massique	897 J/kg.K
		Epaisseur	4 mm
Vitrages	Vitrage clair	Transmission lumineuse	90%
		Facteur solaire	87%
Menuiserie	Jalousie	Coefficient de menuiserie	0.8
		Gestion : Ouverture toute l'année durant les périodes d'occupation, à savoir 8h-18h en occupation.	

4.1.5.2. Apports internes

Toutes les données concernant les apports internes sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Apports internes			
	Nombre de personne	300	Salle de restauration
	Chaleur latente par personne	50 W	
	Chaleur sensible par personne	70 W	
	Planning d'occupation	Jour	lundi au vendredi hors jours fériés / vacances
		Horaire	0h-12h : 0%
			11h30-14h : 100%
			14h-23h : 0%

A noter qu'il n'y a pas d'équipements informatiques et que le fonctionnement de l'éclairage artificiel dans la salle de restauration sera ponctuel. Nous n'avons pas pris d'autres charges internes que celles générées par les collégiens.

Vacances scolaires :

19 décembre au 15 janvier

02 mars au 17 mars

01 mai au 12 mai

7 juillet au 21 août

08 octobre au 21 octobre

Jours fériés hors calendrier scolaire :

1 et 11 novembre

1 et 27 avril

31 mars

8, 9, 19 et 20 mai

4.1.5.3. Ventilation

Dans le cas de base, nous sommes partis sur des taux de renouvellement d'air de l'ordre de 5 vol/h correspondant à une évacuation des surcharges thermiques sans utilisation des extracteurs aérauliques.

4.1.5.4. Résultats & Analyse

Après avoir entré tous les paramètres et caractéristiques du bâtiment, nous réalisons le calcul à proprement parlé qui nous donne les résultats suivants :

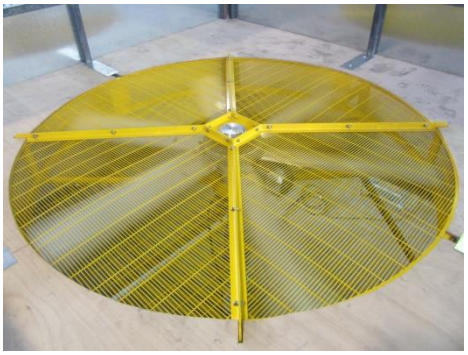
	Pourcentage zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
Restauration	41	59	686	99,7	510	74,1	166	24,1

Nota : Le nombre d'heures d'occupation total sur l'année est de 688h.

Commentaires :

La salle de restauration ne peut fonctionner en ventilation naturelle. En effet, on observe que durant la période d'occupation, près d'un quart des points sont supérieures à une température de 32°C, ce qui est conséquent. Nous avons essayé de placer trois extracteurs aérauliques afin de forcer la ventilation. Ayant étudié en détail ces extracteurs aérauliques, nous connaissons techniquement et physiquement leurs performances.

4.1.5.5. Variante 1 : Augmentation des taux de renouvellements d'air



Ici, nous avons souhaité tester l'influence des trois extracteurs situés en partie haute du patio intérieur de la salle de restauration. Pour cela, nous avons modifiés les taux de renouvellements d'air les passant à une utilisation modérée de l'extracteur puis à une utilisation forte. On sait qu'un extracteur aéraulique type BIGASSFAN a un débit d'extraction de :

Débit moyen : 5.000 m3/h

Débit maximal : 18.000 m3/h

On aura donc pour trois extracteurs et pour une salle d'environ 1200 m3 :

Débit moyen : 15.000 m3/h, soit 12.5 vol/h

Débit maximal : 54.000 m3/h, soit 45 vol/h

	Pourcentage zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
Restauration	51	74	678	98,5	409	59,4	82	11,9
Différence avec le cas de base								
Restauration	10	15	-8	-1,2	-101	-14,7	-84	-12,2

Débit volumique de 12.5 vol/h

	Pourcentage zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
Restauration	58	84	666	96,8	347	50,4	31	4,5
Différence avec le cas de base								
Restauration	17	25	-20	-2,9	-163	-23,7	-135	-19,6

Débit volumique de 45 vol/h

L'usage d'extracteurs aérauliques va permettre d'évacuer efficacement les surcharges thermiques contenues à l'intérieur de la salle de restauration. Ainsi avec un usage à pleine puissance, les températures supérieures à 32°C vont être abaissées jusqu'à 35h sur toute l'année.

4.1.5.6. Variante 2 : Ventilation nocturne

Un test sur une ouverture permanente à 50% de tous les ouvrants a été réalisé.

	Pourcentage zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
Restauration	41	59	687	99,9	508	73,8	166	24,1
Différence avec le cas de base								
Restauration	0	0	1	0,1	-2	-0,3	0	0,0

On remarque qu'il y a peu d'influence de la ventilation nocturne sur le confort thermique de la salle de restauration. En effet, les périodes d'occupation (11h30-14h) font que cette salle sera déjà en charge thermiquement ; l'impact de la ventilation étant essentiellement matinale.

Nous ne retiendrons donc pas cette solution. On conseillera seulement de mettre en fonctionnement les extracteurs 1h ou 2h avant l'arrivée des collégiens pour manger le midi.

Résultats finaux & Conclusion

	Pourcentage hors zone de confort pour v=1m/s (%)	Pourcentage hors zone de confort pour v=1,5m/s (%)	Température intérieure >28°C		Température intérieure >30°C		Température intérieure >32°C	
			Nombre d'heures	%	Nombres d'heures	%	Nombres d'heures	%
BatD_salle1	71	88	1445	76,4	786	41,5	183	9,7
BatD_salle2	78	96	1376	72,7	641	33,9	64	3,4
BatD_salle3	79	96	1366	72,2	631	33,4	62	3,3
BatD_salle4	84	98	1282	67,8	541	28,6	41	2,2
BatE_salle1	79	95	1394	73,7	646	34,1	71	3,8
BatE_salle2	83	98	1303	68,9	572	30,2	41	2,2
BatG_salle1	77	94	1366	72,2	659	34,8	85	4,5
BatA_Salle 2.5	80	97	1452	76,7	614	32,5	53	2,8
BatA_Salle 2.9	72	94	1454	76,8	693	36,6	67	3,5
BatA_Salle 3.2	73	92	1374	72,6	639	33,8	83	4,4
BatA_Salle 4.3	71	93	1452	76,7	673	35,6	75	4,0
BatA_Salle 6.1	71	91	1377	72,8	657	34,7	99	5,2
BatA_Salle info	72	91	1393	73,6	646	34,1	89	4,7
BatA_Restauration	58	84	666	96,8	347	50,4	31	4,5

En conclusion, le confort thermique est atteint dans tous les locaux étudiés. On notera que la salle batD_salle1 est le local où le confort thermique sera moins bon du fait d'une forte solarisation du vitrage et de son pignon. Les autres locaux ayant la même configuration (en pignon) ont une toile d'ombrage au dessus de l'escalier jouxtant ces salles, ceci permettant d'ombrer ces salles.

Trois salles ont besoin d'une ventilation forcée pour fonctionner thermiquement. Il s'agit de la salle restauration et des salles informatiques où les charges internes seront importantes. Pour la salle de restauration, trois extracteurs de type BIGASSFAN modèle ISIS ont été placés pour « pomper » les surcharges thermiques. Concernant les salles informatiques, la CTA permettra d'améliorer les débits de renouvellement d'air au besoin. Dans tous les cas, des brasseurs d'air en nombre suffisants (un pour 15m²) permettront d'apporter des vitesses d'air suffisantes pour que les usagers soient en situation de confort thermique.

Sinon pour toutes les autres salles, le confort thermique sera atteint sans utilisation de système de rafraîchissement artificiel, mais avec une conception sobre et réfléchie dans une logique bioclimatique.

ANNEXE 10 chapitre 4

Dossier RSP ZAC Cœur de Ville OAP

LA POSSESSION

DEPARTEMENT DE LA REUNION

REVISION SIMPLIFIEE DU PLAN LOCAL D'URBANISME

Opération ZAC Cœur de ville
Orientations d'aménagement et de programmation
Partie II – dispositions particulières

Révision simplifiée
Approuvée par délibération du conseil municipal
En date du

POLE RECHERCHE
Ecoles **D**octorales

LETTRE D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

Je, soussigné(e)Antoine Perrau en ma qualité de doctorant(e) de l'Université de La Réunion, déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à Saint Pierre le 23 Septembre 2020

Signature :

Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 9. Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de tels droits.
En conséquence, chaque utilisateur doit :
- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux
Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.
L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».
L'article L335_3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (…) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.
Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage…) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur…) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.
Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.