



**HAL**  
open science

# La conception bioclimatique des bâtiments du rectorat de Mayotte, un équilibre entre confort et respect de l'environnement

Eulalie Bardoux

► **To cite this version:**

Eulalie Bardoux. La conception bioclimatique des bâtiments du rectorat de Mayotte, un équilibre entre confort et respect de l'environnement. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03619610

**HAL Id: dumas-03619610**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03619610>**

Submitted on 25 Mar 2022

**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.

Copyright



# Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

---

Année 2020-2021

Voie d'approfondissement :  
Bâtiment

Soutenu le 16 septembre 2021

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Mathieu Lavandier
- Maître de TFE : Julien Class
- Expert : Christophe Bernat

Par

**Eulalie BARDOUX**

**La conception Bioclimatique des bâtiments du Rectorat de  
Mayotte, un équilibre entre confort et respect de  
l'environnement**

**Setec organisation**



# Notice analytique

AUTEUR	
Nom	BARDOUX
Prénom	Eulalie
ORGANISME D'ACCUEIL	
Nom de l'organisme et Localité	Setec Organisation, Agence Océan Indien
Nom du Tuteur	Julien Class
ANALYSE DU TFE	
Titre (français)	La conception Bioclimatique des bâtiments du Rectorat de Mayotte, un équilibre entre confort et respect de l'environnement
Titre (anglais)	The Bioclimatic design of the Mayotte's Rectorat buildings, a balance between comfort and respect for the environment
Résumé (français)	<p>Le département de Mayotte est un territoire en pleine expansion démographique, au sein duquel la moitié de la population est mineure. Pour faire face à cette forte tension, le Rectorat de Mayotte a construit une stratégie environnementale très poussée, qui se veut respectueuse des principes de frugalité. Malgré leurs ambitions, la conception Bioclimatique mise en œuvre reste expérimentale, et son développement doit être poursuivi.</p> <p>L'objectif de ce rapport est de mettre en évidence certains points obstruant et certaines incohérences pour aider les maîtres d'ouvrage et leurs équipes à améliorer leur démarche.</p>
Résumé (anglais)	<p>The department of Mayotte is a territory in full demographic expansion, in which half of the population is underage. To face this strong tension, the Rectorat de Mayotte has built a very advanced environmental strategy, which is intended to respect the principles of frugality. Despite their ambitions, the Bioclimatic design implemented remains experimental, and its development must be continued.</p> <p>The objective of this report is to highlight certain obstructive points and inconsistencies to help the project owners and their teams to improve their approach.</p>
Mots-clés (français, 5 maxi)	Conception bioclimatique, ventilation naturelle, système de rafraîchissement passif, confort hygrothermique
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Bioclimatic design, natural ventilation, passive cooling system, hygrothermal comfort

Termes géo- graphique (français)	Etude faite sur des bâtiments scolaires de Mayotte.		
<b>COLLATION</b>			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	77	2	12



# Déclaration de travail personnel

---

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

# Remerciements

---

Je te tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné dans mes recherches et la rédaction de ce rapport.

Dans un premier temps, je voudrais remercier Tristan CALVET qui m'a accordé de son temps pour me guider et m'enseigner son métier de conducteur d'opération. Sa bonne humeur et ses judicieux conseils m'ont permis d'avancer sereinement tout au long de mon stage et de prendre confiance en moi.

Je remercie également Julien CLASS pour sa bienveillance, ses conseils et son accueil au sein de l'agence Océan Indien ainsi que Marion ANSIDEI pour sa gentillesse et ses bons plans.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes ayant répondu présent pour parler du Bioclimatisme à Mayotte avec moi et pour avoir m'avoir apporté des réponses à mes questions. Ainsi, je remercie M. David BOULY, M. Fahd MESTOUR, M. Alain BORNAREL, Mme Neija FERJANI et plus particulièrement M. Christophe BERNAT pour avoir accepté de se présenter en tant qu'expert de mon TFE.

Je désire aussi remercier M. Mathieu LAVANDIER pour sa réactivité et pour son accompagnement au cours du stage et l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'ENTPE pour ces 3 merveilleuses années d'enseignement.

Enfin, je tiens à remercier Damien COLARD pour ses encouragements et son soutien.

# Sommaire

---

Notice analytique.....	2
Déclaration de travail personnel.....	4
Remerciements .....	5
Sommaire.....	6
Liste des illustrations .....	8
Introduction.....	10
1. Diagnostic de l'île .....	11
1.1 Le contexte environnemental de Mayotte.....	11
1.1.1 Informations générales.....	11
1.1.2 Topographie.....	12
1.1.3 Contexte environnemental unique .....	13
1.2 Le contexte démographique et économique .....	14
1.2.1 Flux migratoires important.....	14
1.2.2 Démographie.....	14
1.2.3 Jeunesse de la population .....	15
1.2.4 Pauvreté.....	16
1.3 Contexte éducatif .....	17
1.3.1 Plan de relance : .....	18
1.4 Historique architectural de l'île et l'influence de la métropole.....	19
1.4.1 L'habitat traditionnel .....	19
1.4.2 1978-1997 : L'architecture d'Attila Cheyssial et les cases SIM .....	19
1.4.3 L'influence des constructions occidentales et normalisation.....	22
2. Définition de la conception Bioclimatique à Mayotte.....	23
2.1 Des acteurs dont l'ambition est de revenir aux techniques frugales et traditionnelles.....	23
2.1.1 Le concept de frugalité .....	23
2.1.2 Le système d'acteur autour du Rectorat de Mayotte.....	24
2.2 Les grands principes de la construction Bioclimatique à Mayotte.....	27
2.2.1 La recherche de l'équilibre entre confort et consommation d'énergie .....	27
2.2.2 La ventilation naturelle .....	29
2.2.3 Etude du site .....	31
2.2.4 Conception du bâtiment et optimisation de la ventilation naturelle .....	34

2.2.5	La protection contre les rayonnements directs du soleil.....	35
2.2.6	L'inertie des bâtiments.....	38
2.2.7	La végétalisation des abords.....	38
2.2.8	L'utilisation des énergies renouvelables et bâtiments autonomes.....	39
2.2.9	Le choix des matériaux .....	39
2.3	Des référentiels pour construire à Mayotte.....	42
2.3.1	MayEnergie plus .....	43
2.3.2	PERENE.....	44
2.3.3	Label HQE addendum applicable aux DOM-COM.....	45
2.3.4	Référentiel du Rectorat .....	46
2.4	Exemple de bonnes pratiques, des projets du Rectorat de Mayotte .....	47
2.4.1	Collège de Bouéni .....	47
2.4.2	Collège Marcel Henri, Tsimkoura .....	51
3.	Les limites au développement des constructions Bioclimatiques à Mayotte.....	53
3.1	Des études sur le confort et le vent peu maîtrisées .....	53
3.1.1	La complexité de prévoir les données de vent d'un terrain .....	53
3.1.2	L'étude du confort .....	55
3.1.3	Les limites de certains référentiels.....	57
3.2	Des ressources locales limitées .....	58
3.2.1	Foncier .....	58
3.2.2	Importations de la matière.....	60
3.2.3	Quel conséquences pour les opérations du Rectorat ? .....	61
3.2.4	Le manque d'acteurs compétents sur place.....	62
3.3	Le manque de retour d'expérience.....	64
3.3.1	Le manque de preuve concernant la fiabilité de la conception Bioclimatique à Mayotte 64	
3.3.2	Des premiers résultats sur la conception bioclimatique des collèges et lycées.....	65
3.4	Difficile équilibre entre modernité et traditions .....	69
3.4.1	Constructions inspirées des normes occidentales .....	69
3.4.2	Des habitudes en incohérence avec la conception bioclimatique.....	70
3.4.3	Agir pour améliorer les conceptions mahoraise et prendre en compte l'usage actuel	72
	Conclusion .....	74
	Bibliographie.....	75
	Annexes .....	76

# Liste des illustrations

---

Figure 1 - carte IGN des zones avec d'aléa fort

Figure 2 - photo de Grande Terre et du lagon mahorais

Figure 3 - Evolution du nombre d'habitant entre 1958 et 2018, référentiel des collèges et des lycées du rectorat de Mayotte

Figure 4 - taux de pauvreté en 2018 par région (%), INSEE

Figure 5 - bidonville de Kawéni, David Lemor, 2018

Figure 6 source : référentiel des lycées

Figure 7 - Case traditionnelle

Figure 8 - Livraison d'un nouveau quartier Sim, 1998

Figure 9 - Collège de Tsimkoura, 1983

Figure **10** - Organigramme des principaux acteurs engagés dans le Bioclimatisme à Mayotte qui accompagnent le Rectorat de Mayotte dans leurs projets

Figure 11 - diagramme de Givoni théorique

Figure 12 - Exemple d'un diagramme de Givoni de Mayotte en saison sèche et en saison humide d'après le référentiel MayEnergie

Figure 13 - Schéma de l'effet de cheminée, guide du confort d'été passif, Tribu

Figure 14 - Schéma de la ventilation traversante, guide du confort d'été passif

Figure 15 - Schémas de l'influence de la taille et de la position des ouvrants sur le débit de l'air, université Mohamed Khider

Figure 16 - illustration d'une jalousie et d'un moucharabieh, source : recherche internet

Figure 17 - diagramme des vents à l'aéroport de Pamandzi mesuré pendant 1 an

Figure 18 - Résultats de la simulation aéraulique du lycée de Chirongui

Figure 19 - Maquette utilisé pour les mesures en soufflerie du collège de Bouéni, LEU Réunion

Figure 20 - Plan masse environnementale et course du soleil pour le projet de restructuration du collège de Tsimkoura de Mayotte

Figure 21 - photos à gauche : bâtiment construit par l'architecte Attila Cheyssial à Tsimkoura avec débord de toiture et sur-toiture ventilé. Photo à droite : modélisation du projet de restructuration du collège de Tsimkoura avec des brises soleil à lames horizontales et des coursives extérieurs.

Figure 22 - Comparatif de l'empreinte carbone de trois techniques constructives différentes réalisées à la Réunion

Figure 23 - Atelier Ya Hazi, photo prise par Daman Studio

Figure 24 - Photo du collège de Bouéni, LAB Réunion

Figure 25 - Coupe sur site du collège de Bouéni pour l'étude du potentiel de ventilation naturelle du terrain

Figure 26 - Etude de la course du soleil et de l'orientation du vent sur le plan masse du collège de Bouéni, LEU Réunion

Figure 27 - Simulation de l'ensoleillement sur une façade orienté au Nord à 8h et à 14h le 21 juin, LEU Réunion

Figure 28 - Diagramme de Givoni obtenu après STD pour une pièce du collège de Bouéni, LEU Réunion

Figure 29 - Photo de la cour actuelle du collège avec la présence des bâtiments d'origine

Figure 30 - Perspective de la future cour du collège, Tand'M et Co-architecte

Figure 31 - zonage thématique, référentiel PERENE

Figure 32 - taux de confort de Givoni en occupation dans les locaux instrumentés, Menighetti Parvis et In'Terra

Figure 33 - Nombres d'heures où la température intérieure est supérieure à 30°C pendant les horaires d'occupation dans les locaux instrumentés, Menighetti Parvis et In'Terra

Figure 34 - Photos d'opérations de la SIM avec des conceptions peu adaptées au climat mahorais

Figure 35 - Opération de la SIM, Doujani, fenêtre bouchée à l'aide d'un rideau

Figure 36 - Atelier réalisé au collège de Tsimkoura sur l'impact de l'homme sur son environnement avec comme cas d'étude le projet de restructuration du collège

## Introduction

Le groupe d'ingénierie Setec, créé en 1957, rassemble plus de 3000 collaborateurs répartis dans une quarantaine de sociétés, en France et à l'international.

Setec organisation est une filiale de Setec, créée en 1970 pour répondre à la demande des maîtres d'ouvrages publics et privés en assistance au management de leurs projets. Elle compte aujourd'hui plus de 150 collaborateurs et des agences en France et à l'international. Forte d'une expérience en Conseil et Assistance à Maîtrise d'Ouvrage (AMO) de plus de 50 ans, Setec Organisation est spécialisée dans la gestion de projets, la conduite d'opération (COP) et la Maîtrise d'Ouvrage déléguée de grands projets d'aménagement, de bâtiment et d'infrastructure de transport. Setec Organisation s'installe sur l'île de la Réunion en 2014 pour développer son activité sur l'île et dans un second temps, dans l'Océan Indien. Depuis 2019, l'agence accompagne le rectorat de Mayotte, l'un des plus grands porteurs de projet de l'archipel, dans ses projets scolaires.

L'agence Océan Indien m'a accueillie au sein de leurs locaux réunionnais pendant mon stage de fin d'études. Dans ce cadre, j'ai eu l'occasion de participer aux missions de COP pour le compte du Rectorat de Mayotte. Ce rôle consiste en l'accompagnement, le conseil et la prévention des risques durant les différentes phases d'un projet de construction. Pour des opérations telles que celles demandées par le Rectorat de Mayotte qui se veut être exemplaire dans la construction durable, l'enjeu est d'anticiper au mieux les difficultés qu'ils rencontreront pour aboutir aux objectifs prédéfinis.

Pendant les cinq mois passés dans l'agence j'ai pu appréhender les problématiques du territoire mahorais et contextualiser les enjeux de ce nouveau département français. Sur ce territoire au développement accéléré au climat chaud et humide, le Rectorat tente de construire divers bâtiments au rythme des cyclones et d'une récente activité sismique. Il travaille à concilier développement durable et confort des usagers tout en répondant à l'urgence de la demande. Cette réflexion m'a donc menée à la question suivante :

Quelles sont les problématiques rencontrées et à venir liées à la conception durable et la construction du patrimoine du Rectorat de Mayotte ? En tant qu'assistant à Maîtrise d'ouvrage, quels sont les points de vigilance à avoir en tête afin de conseiller et guider au mieux cet acteur dans ses opérations de construction et respecter ses objectifs et ambitions ?

Le rapport suivant présente ma démarche de réflexion pour répondre à cette question. La première partie est consacrée à la présentation du territoire et une mise en contexte. La seconde présente divers aspects théoriques de la construction durable en climat tropicale et en particulier, à Mayotte. Enfin, dans la troisième partie, je poursuis en identifiant les nuances entre théorie et pratique. Cette dernière partie m'a permis de mettre en lumière les points de vigilance que devra avoir Setec organisation dans l'accompagnement du Rectorat de Mayotte.

## 1. Diagnostic de l'île

Mayotte voit ses premiers habitants swahilis s'installer aux VIIIème et IXème siècle. Pendant cette période, ses habitants sont relativement peu nombreux. Peu de texte présente la vie de ces mahorais. Lorsque l'île est mentionnée et cartographiée dans les écrits du passé, c'est en prévention, pour permettre aux navigateurs d'éviter les récifs de corail qui représentent un danger de mort.

Une lignée de sultans occupera l'île de 1470 jusqu'en 1841 et établira la pratique de l'islam sur l'île. Mayotte sera ensuite vendue à la France. Elle compte alors 3000 habitants dont près de la moitié sont des esclaves. A la suite de l'abolition de l'esclavage et la Révolution française, l'archipel sera progressivement abandonné et la nature reprendra ses droits.

Au XXème siècle, le gouvernement français développera la culture de la vanille, du café, de la noix de coco, de l'agave et de plantes à parfums (citronnelle et Ylang-Ylang par exemple) et le territoire sera peu à peu repeuplé. Après la Première Guerre mondiale, la société des Nations reconnaîtra la souveraineté de la France à Mayotte et placera les îles des Comores sous tutelle française. Les Comores obtiendront leur indépendance en 1973. De leur côté, les Mahorais étant défavorables à une scission de la France, l'île obtiendra le statut de département français en 2011 puis le statut de région ultrapériphérique de l'Union Européenne en 2014.

### 1.1 Le contexte environnemental de Mayotte

#### 1.1.1 Informations générales

Mayotte, plus jeune département français est situé entre l'Afrique et Madagascar, dans le canal du Mozambique et de l'océan Indien, et forme un archipel constitué de deux principales îles (Grande-Terre et Petite-Terre) et de plusieurs petits îlots. L'annexe 1 de ce présent rapport présente une carte du territoire et de sa topographie. L'aéroport se trouve sur Petite-Terre à Dzaoudzi et on peut rejoindre le chef-lieu, Mamoudzou, situé au Nord-Est de Grande-Terre, par bateau.

La superficie de l'archipel est de 376 km<sup>2</sup> et représente le 5<sup>ème</sup> plus petit département de France. En comparaison, il est presque sept fois plus petit que la Réunion.

Son climat est tropical de type maritime, ses températures sont toujours élevées (elles varient entre 25 et 30°C et la moyenne annuelle est de 26,7°) et l'année est rythmé par deux saisons :

- L'été austral : saison chaude et humide qui débute en novembre et fini en avril. A cette saison, l'humidité peut atteindre 95% la nuit.
- L'hiver austral : saison sèche et plus fraîche qui débute en mai et fini en octobre



L'annexe 2 de ce présent rapport présente un tableau comparatif de la température, la pluviométrie et l'ensoleillement à Mayotte et à Marseille. Pour un ensoleillement équivalent à l'année, la pluviométrie y est plus de deux fois supérieure, de même pour les températures et l'humidité relative qui sont toujours plus élevées à Mayotte.

### **1.1.2 Topographie**

L'archipel de Mayotte s'est formé à la suite d'éruptions volcaniques. Ces volcans se sont éteints depuis des millénaires. Le passé volcanique des îles mahoraises a dessiné le relief actuel avec ses fortes pentes et ses ravines. Ainsi, 63% de l'île a des pentes supérieures à 15% et on retrouve 5 sommets à plus de 450 m d'altitude. De plus, le territoire se hisse sur des couches géologiques volcaniques très hétérogènes qui contraignent fortement la conception et l'étude de la portance. Depuis 2018, le territoire connaît de nombreux épisodes sismiques dont les épicentres se trouvent à 10km de Mayotte. Selon les scientifiques, ces évènements pourraient être provoqués par la formation de nouveaux cônes volcaniques.

Du fait que ce département soit situé en région tropical et d'un fort taux d'humidité à certaines périodes de l'année, de nombreuses pluies ont formé et continuent à former des ravines, des nappes phréatiques et des forêts. La vie à Mayotte est donc ponctuée de nombreux évènements cycloniques qui provoquent des glissements de terrain et des inondations. Par conséquent, plus de la moitié de l'île est à minima exposée à un niveau d'aléa fort. La Figure 1 représente une carte de Mayotte avec l'ensemble des zones sujettes à au moins un aléa fort.

Ces fortes contraintes font que plus de 60% de l'île est considérée comme inconstructible. Ces surfaces sont souvent utilisées à des fins agricoles et leur occupation n'est pas nécessairement maîtrisée. L'agriculture illégale serait d'ailleurs à l'origine de la disparition de 30ha de forêt chaque année selon la DAAF.

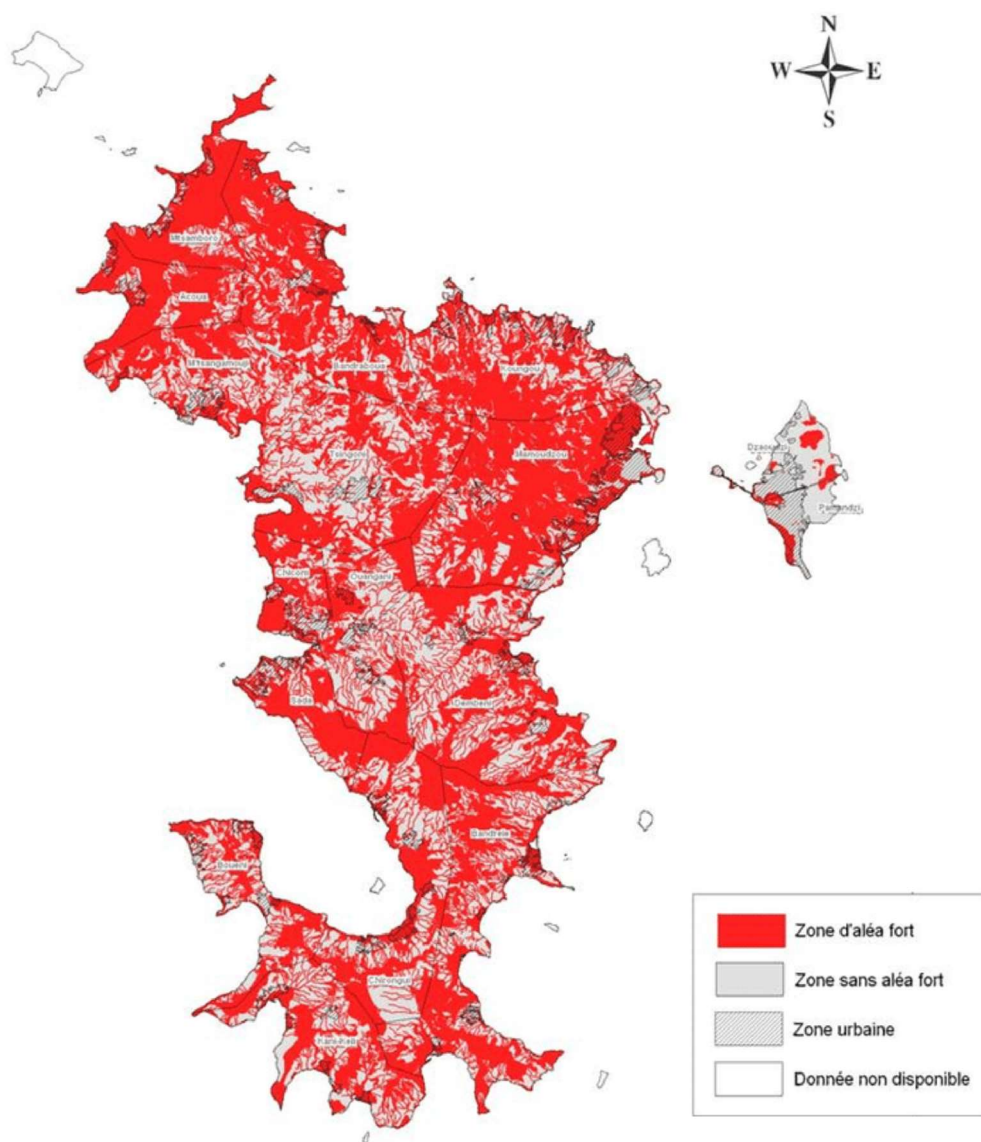


Figure 1 - carte IGN des zones avec d'aléa fort

### 1.1.3 Contexte environnemental unique

L'origine volcanique de l'archipel mahorais nourrit une riche biodiversité sur ses piles. On y retrouve une grande diversité de faune et de flore et de nombreuses espèces protégées. Les mangroves et les zones humides représentent par exemple des écosystèmes remarquables et comptent parmi les dernières forêts primaires du monde.

La richesse de Mayotte se trouve aussi dans son lagon de 1 120km<sup>2</sup> et une double barrière de corail de 195km que l'on ne retrouve qu'à cinq autres endroits dans le monde. Ces eaux turquoise accueillent des centaines de poissons différents, un quart de la diversité de mammifère mondiale et des tortues marines viennent pondre sur les plages de sable blanc mahorais.

Cette grande diversité et ces paysages paradisiaques représentent un atout majeur pour Mayotte dans le développement de son économie locale et du tourisme.



Figure 2 - photo de Grande Terre et du lagon mahorais

## **1.2 Le contexte démographique et économique**

### **1.2.1 Flux migratoires important**

Mayotte connaît une forte migration en provenance des Comores. Depuis les années 1990, ces migrants rejoignent les côtes mahoraises dans de petites barques (« kwassas ») dans lesquelles beaucoup perdent la vie. Finalement, près de la moitié de la population de Mayotte ne possède pas la nationalité française. Ces étrangers recherchent à Mayotte des possibilités de trouver un emploi et des infrastructures de santé et scolaires pour leurs enfants.

### **1.2.2 Démographie**

Cette migration a de grosses conséquences sur le territoire mahorais et sa démographie. En effet, la population de l'archipel est en plein essor et le taux d'accroissement de la population est estimé à 3,8% par an. Aujourd'hui, on compte plus de 282 000 habitants à Mayotte. La Figure 3 illustre bien l'évolution de la démographie qui a été multipliée par 5 depuis les années 80. Mayotte représente donc le territoire Avec la densité la plus importante de France, ainsi que de l'Océan Indien.

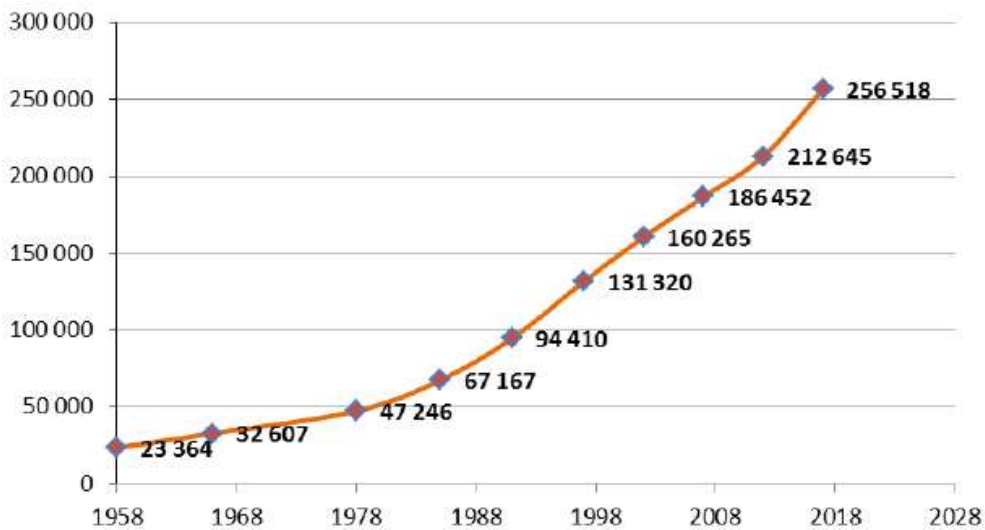


Figure 3 - Evolution du nombre d'habitant entre 1958 et 2018, référentiel des collèges et des lycées du rectorat de Mayotte

Ces chiffres représentant la démographie mahoraise restent des estimations car une partie des habitants sont étrangers en situation clandestine et par conséquent ne sont pas recensés. Il est à noter que ces estimations peuvent être biaisées par le nombre conséquent de clandestins résidant sur l'île.

De plus, la population mahoraise n'est pas uniformément répartie sur l'archipel. Elle est concentrée dans certaines régions. Petite Terre, Mamoudzou et Koungou regroupent ainsi la moitié de la population.

### 1.2.3 Jeunesse de la population

On peut constater que la population mahoraise est particulièrement jeune. En effet, 1/3 des habitants ont moins de 10 ans et la moitié est mineur. Cela est dû, en partie, au nombre de migrantes qui tentent la traversée depuis les Comores pour venir accoucher à Mayotte afin de permettre à leur enfant d'avoir la nationalité française. Ainsi, sur les 10 000 naissances par an à Mayotte, on compte 74% qui sont issues d'une immigration illégale.

De plus, on observe que le taux de fécondité est bien plus important que dans les autres départements français. Celui-ci est de 4,68 alors que la moyenne nationale est de 1,87.

## 1.2.4 Pauvreté

L'accroissement soudain de la population n'est aucunement corrélé à un accroissement aussi important des propositions d'emplois et aujourd'hui le chômage touche 2 personnes sur 3 à Mayotte. Malgré les nombreuses créations d'emplois réalisées par la fonction publique, cela n'empêche pas Mayotte de figurer à la première place dans le classement des départements français avec le plus fort taux de chômage.

La croissance démographique et le manque d'emploi à Mayotte engendrent une précarité importante sur l'archipel. Plus de 75% de la population vit sous le seuil de pauvreté nationale et plus de 30% des mahorais vivent avec moins de 160€ par mois. La Figure 4 permet de comparer le taux de pauvreté dans les différentes régions de France. Là où la moyenne nationale est de 15%, celle de Mayotte s'élève à près de 80%, représentant ainsi le département le plus pauvre du pays.

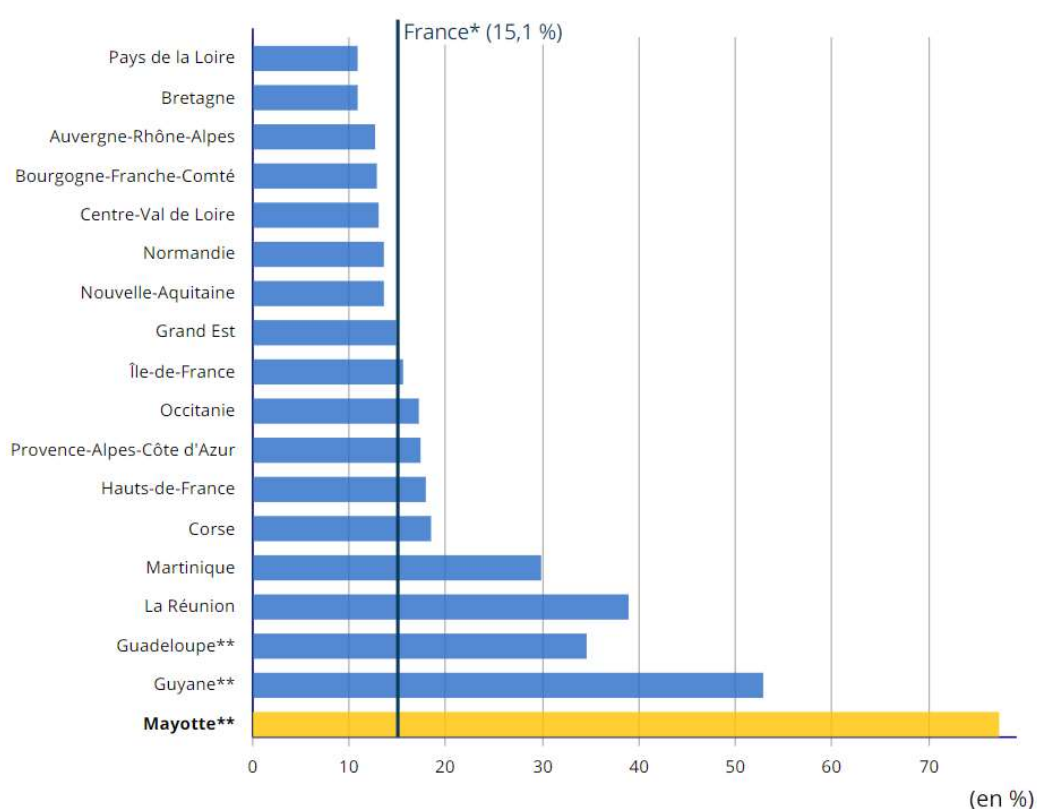


Figure 4 – taux de pauvreté en 2018 par région (%), INSEE

Cette pauvreté peut-être aussi illustrée par le PIB par habitant : celui-ci est de 9 251€ à Mayotte alors que la moyenne nationale est de 32 252€. Ces chiffres alarmants restent toutefois meilleurs que ceux des territoires voisins dans l'océan Indien. En effet, le PIB mahorais représente 3 fois celui des Comores et 24 fois celui de Madagascar.

La misère de ces habitants ne leur permet pas toujours de vivre dans des logements décentes et les habitations insalubres ainsi que les bidonvilles sont très présents sur l'archipel. Les logements en tôles, bois, végétaux ou en terre représentent 3 habitations sur 10. Ces logements sont très souvent surpeuplés et la densité dans certains quartiers de bidonvilles y est très élevée. Les éléments de confort sanitaire sont peu fréquents à



Mayotte et témoignent d'un décalage considérable avec les autres départements français. Plus de la moitié des logements n'a pas accès au confort sanitaire de base, c'est-à-dire à l'eau courante, aux toilettes ou à une douche. De plus, 1/10 (10%) des logements de Mayotte n'est pas relié à l'électricité.

Le nord et l'Est de Mayotte sont les régions les plus touchées par la pauvreté, l'Ouest accueille quant à lui les populations les plus aisées. En revanche, les offres d'emplois sont concentrées autour de Mamoudzou, à l'Est. On observe donc des flux quotidiens de travailleur entre l'ouest et l'est. Cette différence sociale crée de fortes disparités entre les mahorais et accroît la délinquance avec de nombreux vols, cambriolages et autres violences. Ainsi, l'insécurité est présente constamment sur l'archipel et rythme la vie des mahorais.



Figure 5 - bidonville de Kawéni, David Lemor, 2018

### 1.3 Contexte éducatif

La forte croissance démographique et la jeunesse de la population appellent à une augmentation importants des services éducatifs. Néanmoins, le nombre d'établissements n'est pas suffisant pour accueillir l'ensemble des enfants en âge d'aller à l'école (on compte plus de 2 000 nouveaux élèves à accueillir chaque année en 2<sup>nd</sup> degré), les écoles sont surchargées et 30% d'entre elles doivent fonctionner en rotation. Finalement, seulement un tiers des mahorais adultes possèdent un diplôme, selon l'INSEE.

Sur un territoire où la population est très éclectique, les difficultés s'accumulent. En effet, les enseignants doivent gérer, entre autres, le multilinguisme, l'illettrisme familial et les difficultés d'insertion.

Pour soutenir le développement de l'éducation, le gouvernement a placé l'ensemble de ces établissements en catégorie REP (Réseau d'éducation prioritaire) d'une part et 71 écoles et 9 collèges en REP+ d'autre part. Cette catégorisation permet notamment d'obtenir plus de subventions et de réduire le nombre d'enfants par classe.

### 1.3.1 Plan de relance :

Pour pallier les retards de développement du territoire, le gouvernement a publié un plan de convergence et de transformation en 2019, annonçant un investissement de 6 milliards d'euros à l'horizon 2028. Parmi ce budget, 1,65 milliard d'euros a été investi pour 2022 dont 30 % est dédié aux constructions scolaires pour pallier le taux trop élevé de déscolarisation, améliorer les conditions d'enseignement et accroître la réussite scolaire. La Figure 6 représente la répartition de l'investissement du plan de convergence à l'horizon 2022 dans les différents secteurs à développer. Les constructions scolaires représentent donc la plus grande part du budget.

Répartition des engagements en pratique

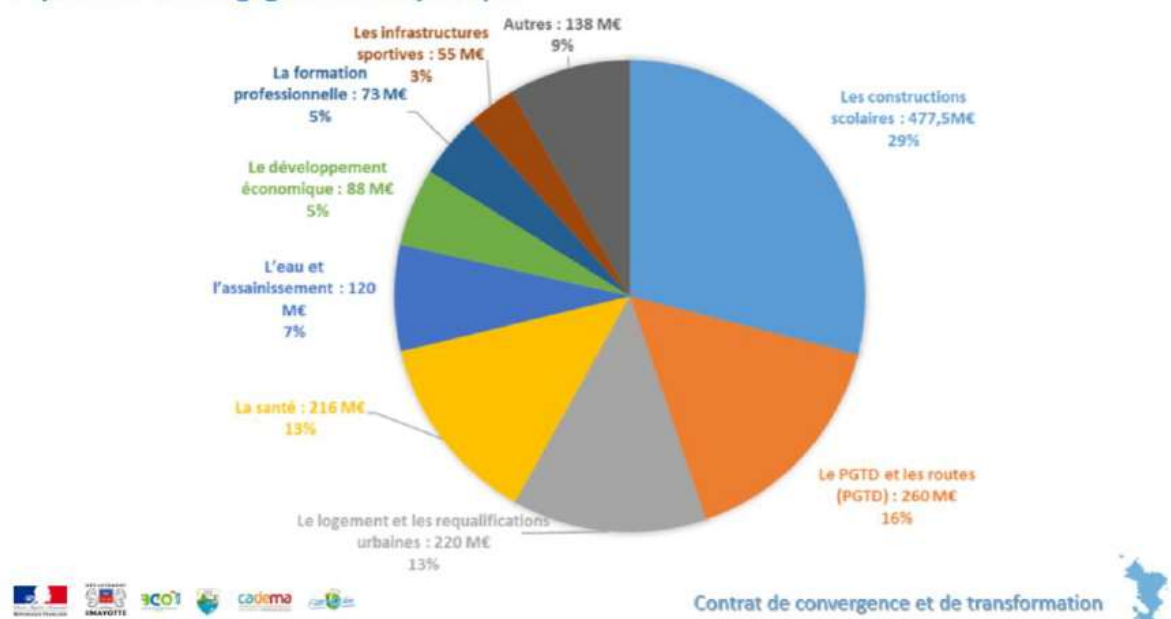


Figure 6 source : référentiel des lycées

En 2017 et 2018 l'investissement annuel représentait environ 55 millions d'euros par an pour le primaire et le secondaire. Celui-ci est passé à plus de 100 millions d'euros par an depuis 2019. Pour réussir à suivre la cadence, le Rectorat a confié des missions de conduite d'opération à des acteurs privés tel que Setec Organisation pour leur prêter main forte et réussir à accroître significativement le nombre de leurs opérations.

## 1.4 Historique architectural de l'île et l'influence de la métropole

### 1.4.1 L'habitat traditionnel

Avant les années 80, les constructions mahoraises étaient faites de terre, de bambou, de raphia et de torchis. On les appelait « Banga ». Ces maisons, ou « cases », étaient construites par les garçons au moment de l'adolescence et permettaient de libérer de la place dans la case des parents. Ils devaient construire seuls une maison dans laquelle ils habiteraient jusqu'à leur mariage. Ils rejoignaient alors ensuite leurs femmes dans la maison que ses parents lui avaient faite. La construction de Banga constituait donc un rite de passage vers l'âge adulte.

Les cases traditionnelles (Figure 7) avaient une ossature en bois d'Ylang-Ylang ou en bambou. Les murs étaient ensuite remplis de torchis (mélange de terre et de paille) et la structure recouverte de palme tressée. Les cases des femmes et des familles étaient complétées avec une cour et une clôture en raphia.



Figure 7 - Case traditionnelle

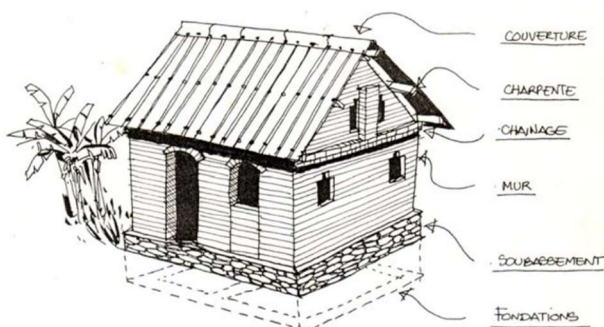
### 1.4.2 1978-1997 : L'architecture d'Attila Cheyssial et les cases SIM

En 1978, deux architectes, Attila Cheyssial et Vincent Lietard, arrivent à Mayotte et participent au développement de l'île. Attila Cheyssial restera un architecte indépendant tandis que Vincent Lietard intégrera la société immobilière de Mayotte (SIM). Ils veulent éviter de reproduire les erreurs passées du développement étatique des autres DROM COM. Ils veulent ainsi valoriser les ressources locales, respecter les modes de vie des habitants, développer l'économie locale et la culture. Ils veulent échapper au béton, minimiser le terrassement et l'utilisation des grues, et construire des bâtiments en adéquation avec leur environnement et leur temps. Leurs bâtiments sont donc construits avec des systèmes de rafraîchissement passif et des matériaux locaux.

Avec l'aide des compagnons du Tour de France, ils forment des artisans mahorais et développent la brique de terre compressée (BTC). Ce matériau est composé de terre argileuse et de pouzzolane (roche basaltique). La fabrication se résume à une compression du mélange dans un moule et une période de séchage. Une vingtaine de briqueries seront construites sur l'île entre 1980 et 2000.



La SIM a été créée pour répondre à la précarité des logements et offrir aux mahorais un confort minimal de vie et de meilleures conditions sanitaires. Elle proposera des habitations en accession et sans endettement pour les propriétaires de terrains à Mayotte. Ces « cases SIM » seront inspirées des cases traditionnelles avec, au départ seulement, deux pièces (deux chambres) installées avec une cour accueillant la cuisine et les pièces communes. De manière à pérenniser la construction, la structure sera réalisée avec des matériaux durs et durables (BTC, pierre, bois de manguier, ...) et de la tôle de couverture. Plus de 16 000 familles seront donc relogées par la SIM à la fin du XXème siècle.



Source : Vincent Liétard, P Rollet – 1983

L'objectif de ces logements était d'offrir des habitations aux mahorais à moindre coût. En effet, ces cases Sim coutaient en moyenne 30 000€ à la société immobilière mais seulement 3 000€ pour les acquéreurs. Cette baisse significative du prix à l'achat vient en majorité des subventions de l'Etat de l'ordre de 90%. Pour réduire encore le prix du logement, la SIM construisait ces cases en auto-construction, c'est-à-dire avec la participation des futurs propriétaires pour réduire les coûts de mains-d'œuvre. De plus les logements seront livrés non achevés, c'est aux propriétaires de réaliser les finitions : enduits, peinture, électricité, plomberie ou carrelage. La SIM met à disposition des propriétaires des pots de peinture avec 30 coloris différents dans l'optique de colorer les villages mahorais. On voit alors des quartiers entiers de case SIM se créer sur l'île.



Figure 8 - Livraison d'un nouveau quartier Sim, 1998

Les occupants de ces cases s'approprient ensuite leurs logements, le modifient et l'agrandissent à leur guise. Les petites cases SIM se retrouvent donc enfouies sous des étages et des pièces rajoutées par les habitants et on a parfois du mal à retrouver l'édifice d'origine.

En parallèle de la SIM, l'architecte Attila Cheyssial construit des bâtiments publics en BTC, en pierre et en bois. Lui choisit de ne pas utiliser de peintures colorées comme les cases SIM et reste sur des teintes naturelles. Il construira notamment des écoles dont le collège de Tsimkoura qui fait l'objet d'un projet de restructuration par le rectorat sur lequel setec organisation interviendra. Son architecture est remarquable pour ses systèmes de rafraîchissement passif : orientation des bâtiments pour recueillir le vent et créer de la ventilation naturelle, construction de sur-toiture ventiler et de protections solaires (débords de toiture, coursives extérieures, ...). Il construira des bâtiments sur toute l'île et développera des structures et techniques innovantes.



Figure 9 - Collège de Tsimkoura, 1983

À la suite des cyclones de 1984 et 1985, aux lourdes conséquences sur les bâtiments mahorais comme arrachement des toitures, la direction départementale de l'équipement demande de développer une structure plus résistante. Attila Cheyssial développe donc la structure POM (plan outre-mer). Cette structure est basée sur la préfabrication sur chantier de poteaux en béton armés dans des moules en bois facilement reproductibles. La SIM utilisera ensuite cette technique pour leurs logements sociaux.

En 1993, un séisme frappe l'île et remet en cause les édifices développés jusque-là. Il faut alors prendre en compte les risques sismiques dans la conception des bâtiments et renforcer la structure avec des éléments horizontaux en béton armés (dalles, chainages).

Les édifices se seront développés avec le temps en passant de la simple case à deux pièces à des structures plus grandes, avec étages ou sur pilotis par exemple, pour s'adapter à de fortes pentes. Les habitations vont s'améliorer aussi en termes de confort puisqu'à partir de 1997, les cases SIM sont toutes livrées avec des sanitaires.

La SIM aura permis aux mahorais d'accéder à la propriété et de se loger décemment. En devenant propriétaire d'une case SIM, les mahorais sont libres de développer leur habitation en fonction de leurs besoins (locaux commerciaux, chambres supplémentaires, ...). Les couleurs des cases SIM se sont implantées dans les paysages mahorais et se sont intégrées à la culture mahoraise. Les constructions de la SIM et de Attila Cheyssial représentent une partie du patrimoine mahorais et ils ont su développer des techniques innovantes de construction durable et respectueuses de l'environnement qui seront repris par la suite.

### **1.4.3 L'influence des constructions occidentales et normalisation**

En 1990 arrive le parpaing en béton sur l'île et le rejet de la BTC par les mahorais commence. Avec ce nouveau matériau se crée le « parpaing épargne ». Le coût de la vie et de la construction à Mayotte devenant de plus en plus élevé, ce matériau permet aux habitants d'acheter au fur et à progressivement et de constituer sur plusieurs années un stock de parpaing pour construire leur maison ou leur extension. En effet, contrairement à la BTC le parpaing résiste aux intempéries et peut rester plusieurs années à l'air libre et sous la pluie. De plus les différents cyclones et tremblements de terre ont entamé le crédit des constructions traditionnelles aux yeux des mahorais et les matériaux locaux sont maintenant perçus comme des matériaux « mous » et peu fiables.

Au début des années 2000, l'administration qui soutenait les démarches de conception durable de la SIM et de l'architecte Cheyssial s'est retirée. La politique de l'habitat social à Mayotte a été remise en cause et la SIM a été critiquée par l'inspection générale des finances pour sa mauvaise gestion. Faute de moyens financiers, la SIM et Cheyssial ont dû se résoudre à reprendre les techniques utilisées en métropole. Les pratiques et les techniques se standardisent, c'est la fin de l'auto-construction et de l'implication des mahorais dans la construction de leurs bâtiments. Les petits artisans font faillites pour laisser la place aux géants du bâtiment. L'économie basée sur l'artisanat local s'est tournée vers l'importation de masse. Aujourd'hui on ne compte plus que cinq fabricants de BTC sur l'île.

L'influence de la métropole a joué un rôle majeur dans les changements de conception des habitations. Les Mahorais souhaitent plus de confort, des logements climatisés et plus grands. Leurs besoins ont changé. La méthode des extensions autour des cases SIM à deux pièces étaient mal conçues. Les propriétaires sont donc obligés de démolir pour reconstruire en béton. De plus, les quartiers SIM ont contribué à l'étalement urbain, les mahorais doivent maintenant construire en hauteur et avoir recours au béton armé.

Tous ces facteurs ont contribué au début du terrassement, à l'apparition des grues, du tout béton et la disparition de la conception durable et locale.

## 2. Définition de la conception Bioclimatique à Mayotte

### 2.1 Des acteurs dont l'ambition est de revenir aux techniques frugales et traditionnelles

#### 2.1.1 Le concept de frugalité

Aujourd'hui, avec le réchauffement climatique qui nous menace, certains acteurs mahorais cherchent à revenir à une construction plus locale et plus respectueuse de l'environnement, avec des objectifs similaires à ceux de Vincent Lietard et Attila Cheyssial en 1980. La notion de frugalité revient souvent dans leurs discours : frugalité en énergie, en matière, en technicité et une frugalité basée sur une production locale.

Cette notion de frugalité, ou aussi de *Low-tech* est développée dans le manifeste pour une frugalité heureuse et créative, écrite en 2018 par Dominique Gauzin-Müller (architecte, spécialiste de la construction bois et écologique), Alain Bornarel (ingénieur et fondateur du bureau d'étude TRIBU) et Philippe Madec (architecte urbaniste, pionnier de l'éco-responsabilité). En plus de proposer plusieurs écrits sur cette notion, des conférences et des rassemblements sont organisés entre les signataires de la France entière. Le but est de partager les savoirs, faire évoluer les standards de la construction, développer les filières locales et échanger sur les retours d'expérience de chacun.

L'ensemble des points abordés lors de ces conférences tournent autour du « Bio-inspiré ». Pour définir ce terme, Philippe Madec et Allain Bornarel parlent de « récolter sagement les fruits de la nature », c'est être en symbiose avec l'environnement et s'inspirer des écosystèmes qui nous entourent. Pour cela, les membres appartenants au groupement cherchent à trouver des solutions pour limiter l'impact environnemental de leurs projets et réduire leurs consommations d'énergie.

Il y a vingt ans les questions qui étaient posées en France métropolitaine étaient : comment réduire les consommations d'énergie en hiver et s'isoler du froid ? Aujourd'hui, l'enjeu est de préparer le réchauffement climatique. Il faut donc superposer cette problématique à celle du refroidissement des bâtiments en été et créer de la ventilation naturelle dans des bâtiments trop isolés. C'est la « Métamorphose », le passage du Bioclimatique d'hiver au Bioclimatique d'été. Dans des îles comme Mayotte et la Réunion, la thématique de Bioclimatisme d'hiver ne constitue pas nécessairement une priorité, en revanche le sujet du Bioclimatisme d'été est actuel et le sera d'autant plus avec le changement climatique.

Un groupe de partage a été créé à la Réunion. Mayotte ne comptant pas encore assez de signataires, les mahorais sont invités au groupe réunionnais. De plus, les problématiques entre les deux îles sont similaires sur certains points comme le refroidissement des bâtiments, l'utilisation intensive de la climatisation, leur caractère insulaire, la dépendance aux importations des deux territoires et leur climat tropical. Des solutions comme l'utilisation des ressources naturelles du terrain pour créer du refroidissement passif et de l'ombre, l'exploitation d'énergies renouvelables (le soleil, le vent, ...) et la réduction de la production de déchet sont développées. D'autres sujets

complémentaires sont abordés lors de ces temps de partage : le réemploi et la réhabilitation, la prise en compte de l'urbanisme du territoire, la diminution de la pauvreté et des bidonvilles, et la priorisation de l'activité locale ainsi qu'une meilleure intégration de l'économie informelle.

### 2.1.2 Le système d'acteur autour du Rectorat de Mayotte

Le Rectorat de Mayotte développe une stratégie forte pour construire durable les futurs établissements scolaires. En ce sens, certaines personnes du Rectorat soutiennent et font partis des signataires du manifeste pour une frugalité heureuse et créative. En parallèle de cette communauté, pour développer le Bioclimatisme à Mayotte et de nouvelles technologies, le Rectorat peut compter sur différents acteurs engagés, présentés ci-dessous et sur la Figure 10.

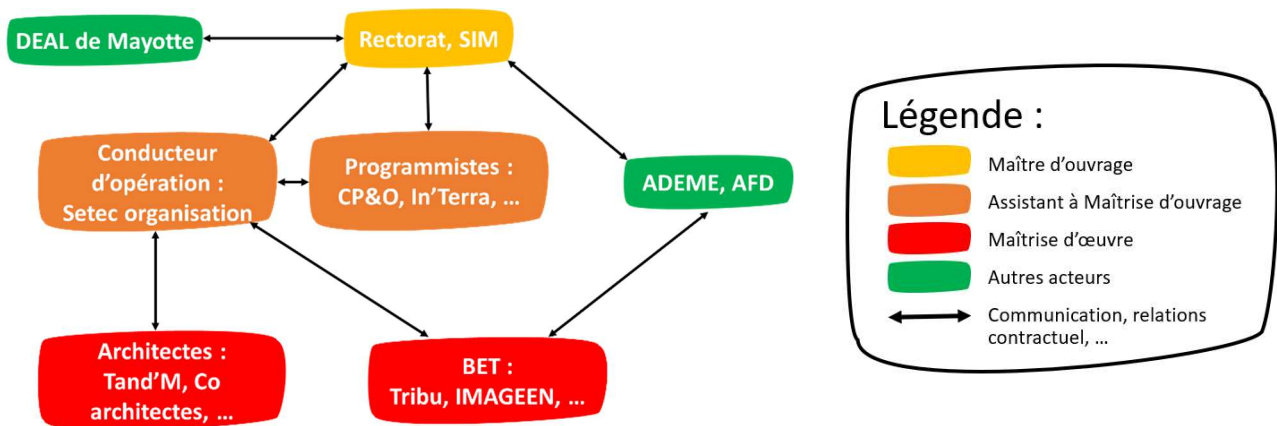
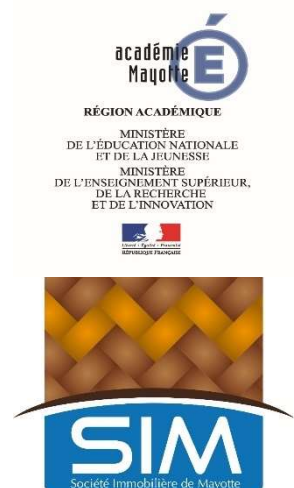


Figure 10 - Organigramme des principaux acteurs engagés dans le Bioclimatisme à Mayotte qui accompagnent le Rectorat de Mayotte dans leurs projets

De grands porteurs de projet comme le rectorat de Mayotte et la SIM ont complètement intégré ces notions dans leurs objectifs et expérimentent de nouvelles techniques lors de la conception de leurs bâtiments. Ils se veulent exemplaires pour pousser l'ensemble des acteurs mahorais à adopter les mêmes objectifs. L'enjeu est de convaincre les mahorais de l'efficacité du réchauffement passif et du Bioclimatisme en général. Ce sont des acteurs prépondérants, qui investissent dans des solutions d'avenir et demandent en retour que les entreprises mandataires de leurs projets avancent des moyens conséquents pour les suivre dans leurs démarches







Pour monter un projet, les maîtres d'ouvrage sont accompagnés de programmistes qui les conseillent pour produire le programme de l'opération. C'est lors de cette étape que les objectifs et caractéristiques du futur bâtiment sont décidés, allant de la définition des surfaces jusqu'au pourcentage d'inconfort minimum ressenti dans les pièces par an. Le rectorat de Mayotte s'entoure donc d'entreprises telle que In'Terra (spécialisée dans la construction durable) ou CP&O. Avec l'aide de ces acteurs, le Rectorat de Mayotte a créé un référentiel en 2021 qui permettra d'unifier les programmes de leurs futures opérations de collège et de lycée, simplifier cette étape et augmenter en efficacité en phase d'exploitation. Ce référentiel leur permettra aussi d'être plus exigeant dans leurs démarches de construction durables et gagner en frugalité.



De plus, les maîtres d'ouvrage sont régulièrement accompagnés et conseillés par des assistants à maîtrise d'ouvrage. Setec organisation qui m'a accueilli pour réaliser mon stage, joue le rôle de conducteur d'opération (COP) pour le compte du rectorat de Mayotte sur plusieurs de leurs opérations. Dans ses missions, setec doit représenter la maîtrise d'ouvrage et assurer la bonne conformité du programme tout au long de sa mission, tout en équilibrant la balance entre le coût, la qualité et les délais.

Dans les groupements de maîtrise d'œuvre on retrouve des architectes et des bureaux d'études techniques qui répondent aux besoins des maîtres d'ouvrage en considérant l'ensemble des objectifs établis. Des architectes comme Tand'M et Co architectes dessinent des bâtiments à haute valeur environnementale sur l'île de la Réunion et à Mayotte. L'architecture du bâtiment est une notion clés dans la conception Bioclimatique. C'est lors de cette étape de dessin qu'on peut, par exemple, jouer sur l'orientation du bâti, la prise aux vents et la protection contre les rayonnements directs du soleil. Les bureaux d'étude techniques vont quant à eux réaliser des expertises pour prouver l'efficacité du futur bâtiment. Tribu, le bureau d'études d'Alain Bornarel, est un exemple de BET spécialisé en construction durable et en Bioclimatisme.





En dehors de ce schéma maîtrise d'ouvrage / maîtrise d'œuvre, on trouve des acteurs comme la DEAL de Mayotte (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), l'ADEME (l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et l'AFD (l'Agence Française de Développement) qui accompagnent et construisent un cadre pour les porteurs de projets. En effet, les projets à Mayotte seront soumis à une réglementation thermique, aéraulique et acoustique française, en cours de rédaction par la DEAL. De plus, la DEAL intervient en tant que représentant du gouvernement en aidant les maîtres d'ouvrage à développer leurs projets. Ils interviennent aussi lors de l'instruction et du traitement des procédures administratives requises pour la construction des établissements scolaires. Lors du cadrage réglementaire, par exemple, en fonction du dossier reçu et des impacts du projet sur l'environnement, la DEAL a le pouvoir d'instruit une autorisation environnementale.



L'ADEME, de son côté, conseille des maîtres d'ouvrage dans leurs projets d'aménagement et elle est à l'origine du référentiel MayEnergie qui guide l'ensemble des acteurs du bâtiment dans la construction durable à Mayotte. L'AFD quant à elle, intervient auprès des acteurs publics locaux pour les conseiller dans le financement de leurs projets en faveur d'un développement aux vertus sociales et en cohérence avec les accords de Paris.

Cette liste d'acteurs est loin d'être exhaustive et de nombreuses autres personnes s'investissent dans cette cause à Mayotte. Ici on ne parle pas des entreprises locales de construction, des associations mahoraises, des autres porteurs de projets par exemple.

## 2.2 Les grands principes de la construction Bioclimatique à Mayotte

### La conception Bioclimatique

L'architecture bioclimatique consiste à profiter au maximum de l'environnement d'un bâtiment et obtenir un confort intérieur tout au long de l'année en dépensant peu d'énergie. Cette notion se développe dans le monde entier et prend des formes diverses en fonction de la région, du climat et du contexte. En effet, les objectifs et l'opportunité qu'offre le terrain ne seront pas les mêmes que l'on soit dans le Nord de la France ou à Mayotte. En région tropicale et notamment sur les territoires insulaires en bord de mer, la température et l'humidité sont très élevés. L'enjeu est d'abaisser les températures ressenties dans les bâtiments et se protéger du soleil. Ainsi, on cherche notamment à récupérer au maximum le vent pour créer de la ventilation naturelle traversante.

### 2.2.1 La recherche de l'équilibre entre confort et consommation d'énergie

Les bâtiments et le secteur de la construction sont responsables de 40% de notre consommation en énergie et 35% des émissions de gaz à effet de serre. L'objectif de la construction *Low-tech* est d'atteindre le confort sans utiliser de système consommant trop d'énergie.

Quatre paramètres du confort sont à prendre en compte :

#### Le confort olfactif :

Un renouvellement de l'air minimal doit être maintenu pour avoir un certain confort dans les pièces. En revanche, il faut faire attention aux polluants venant de l'extérieur qui pourraient être gênants (mauvaises odeurs, pollution, ...) et dégrader le confort.

#### Le confort visuel :

Le rayonnement direct du soleil peut créer de l'éblouissement ou à l'inverse une trop forte protection contre le soleil réduit la luminosité d'une pièce et crée une gêne.

#### Le confort acoustique :

Une bonne protection contre les bruits extérieurs et une bonne isolation entre les pièces est nécessaire pour un confort acoustique. La présence de ventilation naturelle complexifie la correction acoustique d'un bâtiment.



## Le confort hygrothermique :

Celui-ci correspond au ressenti de la personne vis-à-vis de la température et de l'humidité. Dans des régions où ces deux facteurs sont très élevés, l'enjeu est de réduire les dépenses énergétiques et réussir à se passer de la climatisation pour des systèmes de refroidissement passifs. Pour cela il faut jouer sur le ressenti des occupants. On cherche à refroidir leurs températures corporelles en créant des courants d'air dans les pièces. On peut abaisser la température ressentie dans une pièce de 4°C avec une vitesse d'air de 1 m/s.

Pour mesurer le confort hygrothermique, on utilise des outils permettant de représenter graphiquement cette notion. L'outil le plus fréquemment utilisé est le diagramme de Givoni, présenté sur la Figure 11, qui représente les zones de confort hygrothermique en fonction de la température, de la vitesse de l'air, de l'humidité relative<sup>1</sup> et de l'humidité absolue<sup>2</sup>. Dans chaque zone, la vitesse indiquée correspond au débit d'air minimum qu'il faut avoir dans une pièce pour atteindre le confort. Par exemple dans la zone jaune, il faut que la vitesse de l'air dans la pièce soit d'au moins 1,5 m/s pour atteindre le confort. Le diagramme s'arrête à 1,5 m/s, il sera difficile d'atteindre le confort, peut-être avec une vitesse d'air très grande (supérieure à 1,5 m/s) mais à ce moment, la vitesse de l'air pourrait devenir une gêne (effet de courant d'air, les feuilles qui s'envolent, etc.).

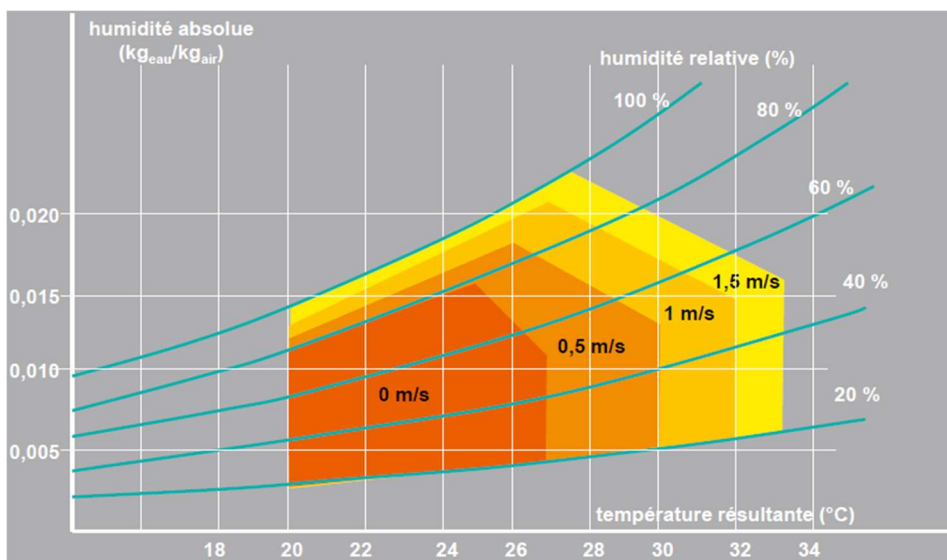


Figure 11 - diagramme de Givoni théorique

<sup>1</sup> Humidité relative : quantité d'eau présent dans l'air sur la quantité d'eau maximum que l'air peut contenir pour une température donnée (en %)

<sup>2</sup> Humidité absolue : quantité d'eau dans l'air (en g/kg)

Un cas de diagramme de Givoni en saison humide et en saison sèche de Mayotte est présenté dans la Figure 12. Il est fourni par le référentiel MayEnergie. Lors de la saison sèche, on peut remarquer que nous sommes toujours dans une zone de confort, en revanche, en saison humide, le nuage de point sort des zones de confort ce qui veut dire qu'une vitesse d'air de 1 m/s ne suffit pas et celle-ci devrait être plus élevée pour éviter que les occupants aient trop chaud.

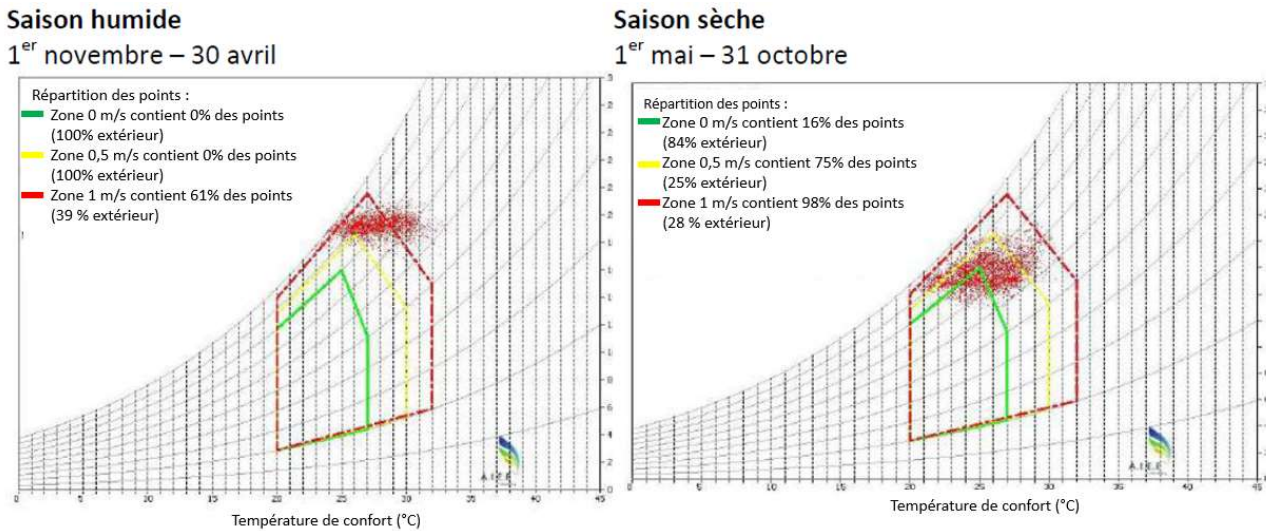


Figure 12 – Exemple d'un diagramme de Givoni de Mayotte en saison sèche et en saison humide d'après le référentiel MayEnergie

## 2.2.2 La ventilation naturelle

### Définition et principe

La ventilation naturelle est la combinaison du renouvellement de l'air hygiénique pour éliminer les polluants d'un bâtiment et le refroidissement passif de la pièce. Pour cela, on crée des accélérations de l'air à l'intérieur et on tente d'atteindre le confort hygrothermique.

Deux principes architecturaux importants sont utilisés dans les régions tropicales :

- L'effet de cheminée : Lorsque l'air extérieur est plus frais que l'air intérieur, on installe des ouvrants en partie basse du bâtiment et des « cheminées » en partie haute, au niveau de la toiture. L'air froid entrant par le bas va créer une pression sur l'air chaud intérieur et la pousser à l'extérieur par les cheminées comme le montre le schéma en Figure 13 réalisé par le bureau d'étude Tribu. Cette solution est très utilisée en ville et dans les zones où il y a peu de vent.

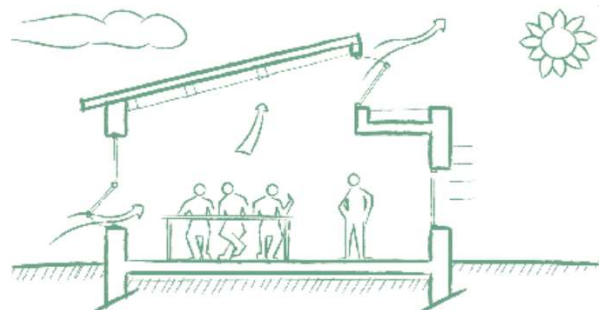


Figure 13 – Schéma de l'effet de cheminée, guide du confort d'été passif, Tribu

- La ventilation traversante : elle utilise le vent pour créer une circulation de l'air dans les pièces. Des ouvrants doivent être présents sur deux faces opposées du bâti au moins, comme le montre le schéma en Figure 14 réalisé par le bureau d'étude Tribu. Ce mécanisme peut être utilisé en parallèle du système de cheminée dans les zones du vent.

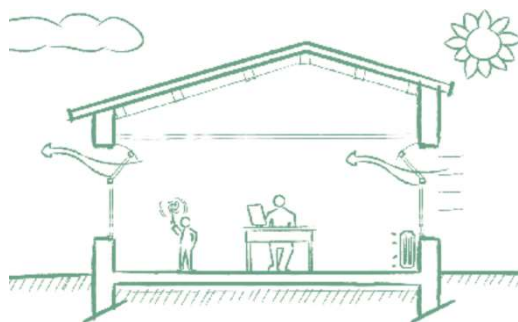


Figure 14 - Schéma de la ventilation traversante, guide du confort d'été passif

### Notion de porosité

La ventilation naturelle dépend du nombre d'ouvrant sur les façades, plus il y a d'ouvrants, plus il y aura d'entrée d'air et plus elle sera efficace. Pour mesurer le taux d'ouverture que doit avoir un bâtiment, on utilise la notion de porosité qui représente la somme des surfaces des ouvrants sur une façade. A Mayotte, le taux de porosité des façades, souvent recommandé, est de minimum 25%. Néanmoins, un équilibre doit être trouvé entre la porosité des différentes façades d'un même bâtiment : la porosité de la façade face au vent doit être inférieure à celle sous le vent pour créer un effet d'accélération de l'air dans la pièce (c'est l'effet Venturi) comme l'explique le schéma en Figure 15.

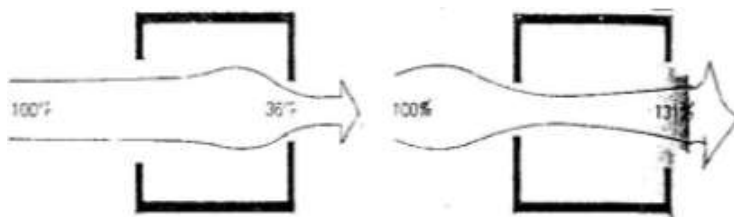


Figure 15 - Schémas de l'influence de la taille et de la position des ouvrants sur le débit de l'air, université Mohamed Khider

Plusieurs systèmes d'ouvrant sont conçus pour favoriser la ventilation naturelle et laisser passer l'air dans une pièce en continu tout en respectant l'intimité et la sécurité d'un bâtiment. On peut citer les jalousies ou encore les moucharabiehs illustrés sur la Figure 16.



Figure 16 - illustration d'une jalousie et d'un moucharabieh, source : recherche internet

De plus, pour accélérer l'air à l'intérieur d'un bâtiment et créer un effet de courant d'air sur les occupants, on place des brasseurs d'air. Ces ventilateurs installés sur les plafonds vont permettre d'augmenter la vitesse de l'air dans les pièces et ainsi, d'améliorer le confort. Ces brasseurs d'air doivent être utilisés en combinaison avec la ventilation naturelle pour plus d'efficacité.

### 2.2.3 Etude du site

La première étape d'un projet est de choisir son site. Dans la conception bioclimatique, cette étape est d'autant plus importante qu'elle va définir la quantité de vent disponible sur la parcelle. En effet la topographie et la présence d'autres bâtiments peuvent créer des effets de masque, ralentir le vent et ainsi réduire les possibilités de ventilation naturelle. Pour prévenir ces problèmes et optimiser au mieux l'architecture et sa ventilation, il est nécessaire de faire des études aérauliques afin de mesurer la vitesse du vent et sa direction tout au long de l'année.

#### Contexte aéraulique de Mayotte

Ces études aérauliques sont ensuite retranscrites sous forme de graphique pour pouvoir les analyser. La Figure 17 représente des exemples de graphiques représentant les données de vent récoltées par Météo France sur la station météorologique de l'aéroport de Pamandzi, sur petite terre. Sur cette figure, le graphique de gauche représente la fréquence du vent en fonction de sa vitesse et celui de droite, la rose des vents, représente la fréquence du vent en fonction de sa direction.

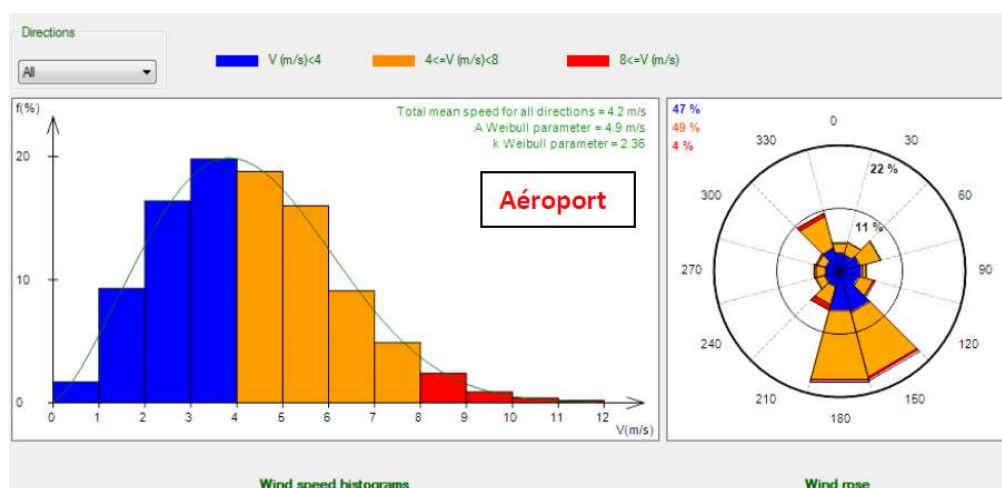


Figure 17 - diagramme des vents à l'aéroport de Pamandzi mesuré pendant 1 an

Les données de l'aéroport permettent de comprendre le contexte aéraulique général de l'île. On observe sur la rose des vents qu'il y a une dominante de vents provenant du Sud/Sud-Est correspondant aux Alizés, un vent qui souffle pendant l'hiver austral, et de vents du Nord-Ouest correspondant au Kashkazi, un vent qui souffle pendant l'été

austral. Les autres vents représentés sont des brises de mer. Ces vents sont perpendiculaires à la côte maritime et dépendent donc de la localisation des mesures. Les brises soufflent vers l'intérieur le jour et vers la mer la nuit, elles sont dû à un phénomène thermique qui crée des dépressions et des courants d'air à cause des rayonnements du soleil la journée et du réchauffement de la terre. Bien que ces données donnent une idée des vents à Mayotte, ces derniers vont différer selon la localisation, la topographie et le terrain. De plus, les brises de mer, dépendent entièrement de la localisation. Ils vont changer que l'on soit sur la côte Est ou Nord, par exemple, et leur intensité sera différente en fonction de la surface terrestre qui les entoure (sur petite Terre, comme son nom l'indique, il y a moins de surface terrestre et donc les brises de mer sont plus faibles que sur Grande Terre). Ainsi, au niveau de l'aéroport de Pamandzi, il y a peu d'obstacle et les données sont récupérées sur un mât à 10m de haut. On obtient donc une vitesse moyenne du vent de 4,5 m/s, un résultat bien meilleur que si l'on se trouvait à flanc de montagne ou en forêt, par exemple.

Pour obtenir ce type de résultats sur un terrain accueillant potentiellement un projet de construction, deux méthodes sont possibles :

### La méthode expérimentale

Cette première méthode consiste à placer un ou plusieurs « mâts de mesure » d'environ 10m de haut sur la parcelle étudiée. Pendant une durée de minimum 12 mois, ces mâts vont récupérer des données aérauliques et météorologiques (température, pluviométrie, ensoleillement, direction, vitesse et orientation du vent). Cette technique est très performante et très précise mais elle n'a encore jamais été utilisée pour une opération à Mayotte. La méthode expérimentale demande d'attendre au minimum 1 an avant d'obtenir les données ce qui n'est pas compatible avec l'urgence en matière d'infrastructure de l'archipel. De plus, elle est très couteuse (entre 30 000€ et 40 000€ pour la pose d'un mât pendant 12 mois).

### Méthode numérique

Dans un contexte de croissance accélérée, cette méthode expérimentale ne semble pas envisageable à Mayotte, une méthode numérique bien plus rapide est donc préférée. Pour cette technique, on utilise les données d'une station météorologique voisine au terrain et on les transpose numériquement à l'aide de la mécanique des fluides sur le site étudié en prenant en compte la rugosité du terrain (présence d'obstacle au sol tel que des habitations ou de la végétation) et la topographie (présence de reliefs montagneux, vallées, ravines, ...).

Cette méthode, bien plus économique que celle des mâts de mesure (quelques centaines d'euros), permet de simuler les vents sur une parcelle en très peu de temps. Toutefois, l'inconvénient est que la station de Pamandzi représente l'unique station de mesure de Mayotte et sa localisation, isolée sur l'île de Petite terre, n'est pas optimale.



Sa distance par rapport à certaines parties de l'archipel peut fausser les résultats obtenus numériquement.

Par exemple, une étude numérique a été réalisée par Météodyn, un bureau d'étude spécialisé dans les simulations aérauliques, lors de la conception du lycée de Chirongui, au Sud-Ouest de grande Terre (voire sur l'annexe 1), à plus de 20 km de l'aéroport. La Figure 18 présente les résultats obtenus. On observe que dans certaines directions, les vents sont atténués à cause de la topographie du terrain et de la rugosité. Néanmoins, le bureau d'étude a estimé un potentiel de ventilation naturelle pour le lycée de 70%. Cette étude à Chirongui constitue la première réalisation d'une analyse aéraulique numérique à Mayotte et le bâtiment n'étant pas encore livré, on ne peut pas encore conclure sur la fiabilité de la méthode. De surcroît, la distance entre l'opération et Pamandzi, et la difficulté à prévoir les brises de mer constituent les points faibles de l'étude et réduiront sûrement cette fiabilité.

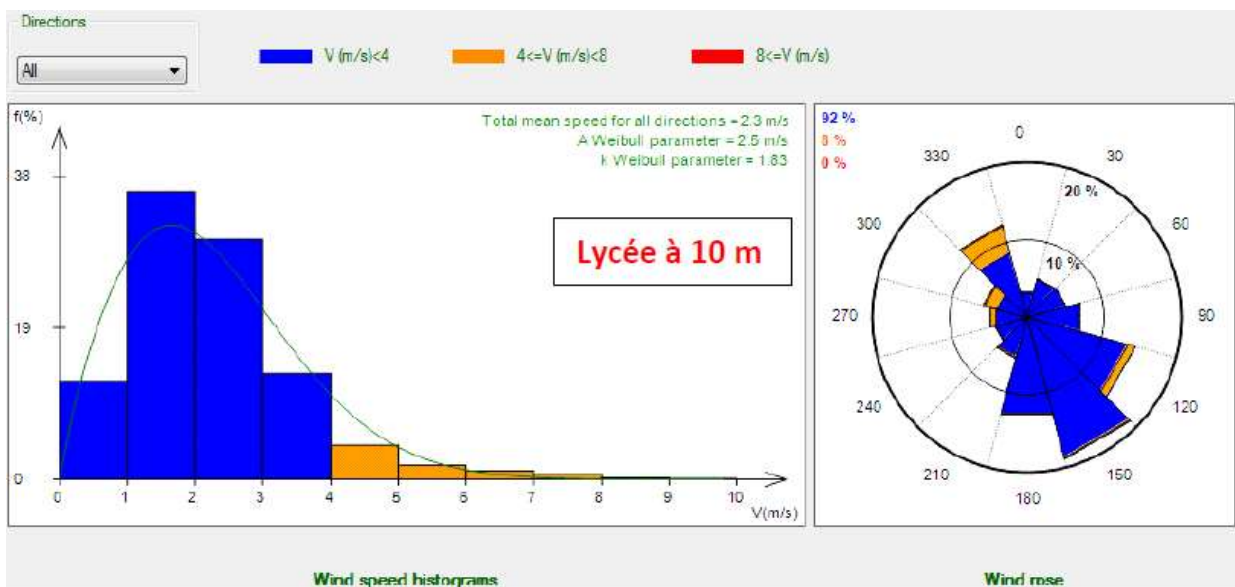


Figure 18 - Résultats de la simulation aéraulique du lycée de Chirongui

## 2.2.4 Conception du bâtiment et optimisation de la ventilation naturelle

Dans un objectif de conception bioclimatique, lors de l'étape de conception du bâtiment, les architectes utilisent les données aérauliques obtenues pour concevoir les bâtiments de façon à optimiser la ventilation naturelle. Il faut alors suivre plusieurs règles :

- Placer les bâtiments perpendiculairement aux vents afin d'optimiser l'entrée de l'air dans les pièces
- Privilégier les pièces traversantes, l'implantation des pièces climatisés en rez-de-chaussée
- Privilégier les bâtiments de faible épaisseur pour favoriser une meilleure circulation de l'air dans les pièces et les bâtiments de grande hauteur pour récupérer plus de vent. De plus en construisant à la verticale, on limite l'emprise au sol et l'étalement urbain.
- Préférer construire plusieurs petits bâtiments qu'un seul très compact. En effet en construisant des structures plus petites et en les plaçant de façon non homogène, des failles aérauliques sont créées et permettent au vent de circuler sans effet barrière.

### Analyse de la circulation de l'air dans les bâtiments

Pour déterminer si la conception le projet dessiné par les maîtres d'œuvre permettra d'atteindre le confort dans les pièces à l'aide de la ventilation traversante, des simulations aérauliques sont réalisées sur le modèle architectural du projet. Ainsi, les bureaux d'études obtiennent le potentiel de ventilation naturelle de chaque pièce. Ils peuvent alors ajuster l'architecture des bâtiments en fonction des résultats. Ces simulations sont appelées CFD (Computational Fluid Dynamics) et peuvent être réalisées numériquement ou expérimentalement. La méthode numérique fonctionne approximativement comme l'analyse aéraulique du site (partie 2.2.3) en utilisant la mécanique des fluides. La méthode expérimentale, quant à elle, est réalisée à l'aide d'une maquette du projet dans une soufflerie. La Figure 19 représente une photo de la maquette utilisée lors de la CFD du collège de Bouéni. Dans les deux méthodes, on prend comme hypothèse de départ les résultats obtenus lors de l'étude aéraulique du site. Ensuite, la pression qu'exerce le vent sur les façades est mesurée dans les différentes directions. Les résultats de pression sur les murs des bâtiments ainsi obtenus, des Simulations Thermiques Dynamiques (STD) peuvent-être réalisées. Ces simulations sont des études numériques qui permettent de conclure, en partie, sur la vitesse de l'air dans les pièces. Ces résultats aérauliques sont obtenus en transposant les pressions et les pertes de charge appliquées aux surfaces des ouvrants en débits d'air dans les pièces.

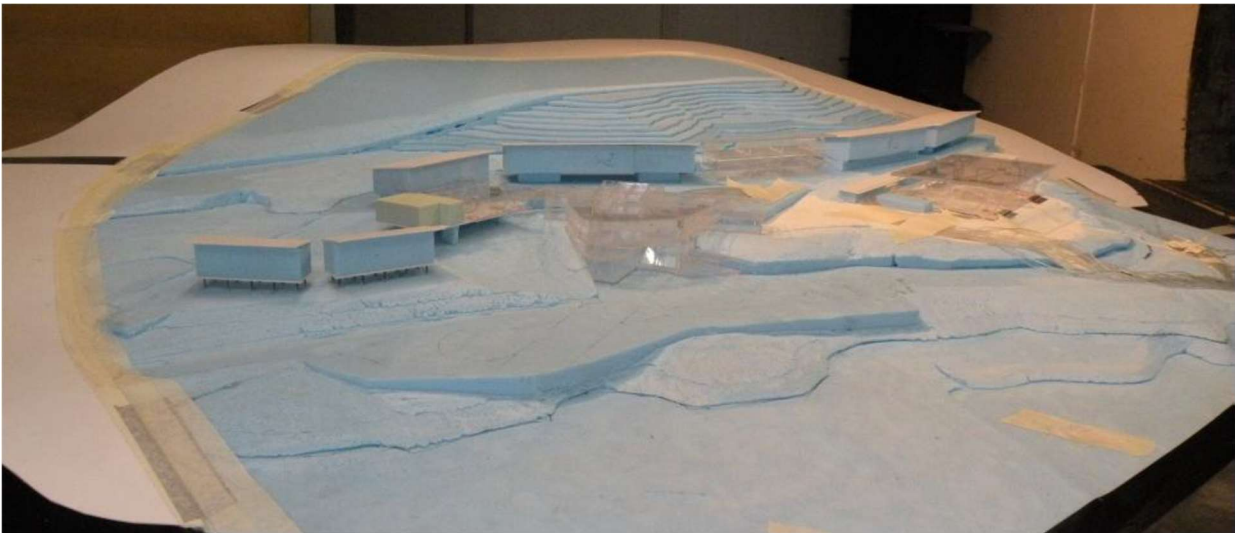


Figure 19 - Maquette utilisé pour les mesures en soufflerie du collège de Bouéni, LEU Réunion

### 2.2.5 La protection contre les rayonnements directs du soleil

Avec un climat tropicale humide et dans une région proche de l'équateur, la température extérieure à Mayotte est très élevée tout au long de l'année. En plus d'avoir besoin d'une bonne ventilation naturelle pour rafraîchir l'air intérieur, il est primordial de bien protéger les bâtiments du soleil et de les isoler des rayonnements directs. A contrario, un bâtiment mal isolé du soleil pourrait créer de grosses surchauffes dans les pièces.

#### Etude de la course du soleil

Pour concevoir au mieux les protections solaires d'un bâtiment, on étudie la course du soleil. L'objectif est d'orienter les bâtiments afin de limiter au maximum les rayonnements directs du soleil sur les façades. La Figure 20 présente la course du soleil de Mayotte présenté sur le plan masse du projet de restructuration du collège de Tsimkoura. Etant dans l'hémisphère Sud de la Terre et proche de l'équateur, le soleil est moins orienté au Sud ou au Nord comme il pourrait l'être en métropole. Ainsi, son rayonnement se fera plus verticalement en milieu de journée (impact fort du rayonnement sur les toitures) et horizontalement en début et fin de journée (impact du rayonnement sur les parois verticales à l'Est et à l'Ouest). La superposition des deux figures permet donc de mettre en évidence l'impact du soleil sur les différents bâtiments. Comme dans le cas du collège de Tsimkoura, l'orientation recommandée est de placer les bâtiments avec la longueur face Sud et Nord et les pignons (avec des surfaces de parois plus faible) côté Est et Ouest.



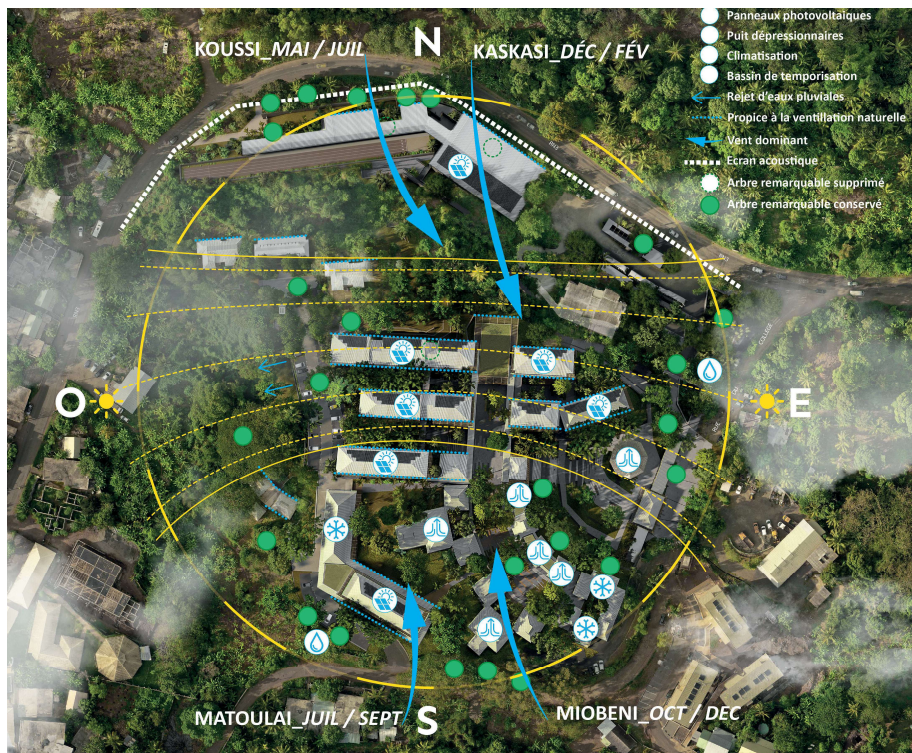


Figure 20 - Plan masse environnementale et course du soleil pour le projet de restructuration du collège de Tsimkoura de Mayotte

### Les protections solaires

L'orientation des bâtiments ne suffit pas pour les protéger du soleil, les façades et la toiture restant exposées au soleil. Ainsi, il est important de créer de l'ombre autrement et d'isoler les parois. Différentes protections sont conseillées :

- Choisir des couleurs claires pour les parois extérieures afin de réfléchir l'énergie du soleil
- Installer des pare-soleils pour créer de l'ombrage sur les parois et les baies : débords de toitures, des brises soleils à lames verticales sur les façades Est et Ouest, et lames horizontales sur les façades Nord et Sud.
- Placer des coursives protégées du soleil à l'extérieur des bâtiments
- Installer des sur-toitures ventilées pour créer de l'ombrage sur la toiture et rafraichir la paroi avec des courants d'air pour limiter la transmission de la chaleur à l'intérieur.



**Figure 21 - photos à gauche : bâtiment construit par l'architecte Attila Cheyssial à Tsimkoura avec débord de toiture et sur-toiture ventilé. Photo à droite : modélisation du projet de restructuration du collège de Tsimkoura avec des brises soleil à lames horizontales et des coursives extérieurs.**

On peut aussi jouer sur l'aménagement intérieur des pièces en évitant de placer les pièces de vie aux endroits les plus exposés.

Néanmoins, ce type d'équipement forme des obstacles au vent devant les fenêtres. Leur orientation et installation doivent être bien réfléchies pour empêcher le moins possible la réalisation de la ventilation naturelle. En effet, l'orientation du bâtiment doit se faire pour que les façades principales soient perpendiculaires aux vents. A Mayotte, l'orientation conseillée des bâtiments est compatible avec la direction des Alizés et du Kashkazi. En revanche, si la conception de la ventilation naturelle d'une opération est basée sur les brises de mer, alors la conception aéroulique et solaire ne seront pas compatibles. Concernant les protections solaires, certains équipements peuvent ralentir les vents entrant par les baies : si les lames verticales et horizontales sont trop épaisses et trop rapprochées par exemple. De plus, ces protections solaires diminuent la luminosité dans les pièces. Cela peut être bénéfique dans le cas où l'on cherche à éviter les éblouissements mais dans d'autres cas plus négatif, en réduisant les apports solaires dans les pièces et ainsi dégrader le confort.

En conclusion, un équilibre doit être trouvé entre ventilation naturelle, protection contre le soleil et luminosité. Les STD vont permettre d'aider la recherche du bon équilibre. En parallèle de l'analyse des débits d'air dans les pièces, la modélisation des protections solaires va permettre de mesurer numériquement les températures et la luminosité dans les locaux et ainsi mettre en évidence les surchauffes et les zones avec des éblouissements ou un manque de lumière naturelle.

### 2.2.6 L'inertie des bâtiments

L'étude de l'inertie des parois est une notion importante dans la conception Bioclimatique. L'inertie d'un bâtiment ou d'une paroi est sa capacité à se maintenir à une température malgré le contact avec le milieu extérieur. Cela lui permet notamment de garder la fraîcheur ou la chaleur dans les pièces. Des matériaux comme la brique, la pierre et le béton ont une forte inertie thermique contrairement, par exemple, au bois. Cette inertie dépend de la conductivité thermique (vitesse de transmission de la chaleur à travers la matière), de l'épaisseur et du facteur d'absorption des rayons solaires du matériau. La recherche d'inertie est d'autant plus importante dans les régions du monde où la différence de température entre le jour et la nuit est grande. En méditerranée, par exemple, on cherche à ventiler au maximum la nuit pour refroidir les parois des bâtiments alors qu'on cherchera à isoler le plus possible pour garder la fraîcheur accumulée à l'intérieur des pièces le jour. Dans ces régions, les constructions sont donc plutôt en brique et avec une structure et des matériaux lourds. A contrario, en climat tropical humide comme à Mayotte, la différence de température entre le jour et la nuit ne dépasse pas les 10°C. Ainsi, la ventilation nocturne ne suffirait pas pour refroidir les pièces et atteindre le confort en journée. Une grande inertie thermique des parois est donc plutôt déconseillée dans cette région. Il est recommandé d'opter pour une stratégie avec des parois fines avec peu d'inertie, une structure légère et un bon système de ventilation naturelle de jour comme de nuit.

### 2.2.7 La végétalisation des abords

#### Bénéfice pour le rafraîchissement passif

La conception bioclimatique est une science qui s'inspire de la nature. La végétation doit donc être omniprésente dans les projets. En plus de rendre un lieu plus agréable et d'améliorer le cadre de vie, la végétation a bien d'autres atouts. En effet, elle permet d'abaisser la température de l'air et d'éviter de créer des îlots de chaleur, de protéger les façades du soleil et de créer de l'ombre. En effet, par évapotranspiration, les végétaux vont rafraîchir l'air extérieur. Cette végétalisation des abords est ainsi bénéfique à la ventilation naturelle et le rafraîchissement passif. En créant une bande végétale autour des façades, l'air va se rafraîchir lors de son passage près des végétaux avant de rentrer dans les pièces. Il est généralement recommandé d'avoir une bande d'au moins 3m de végétation autour du bâtiment.

Les toitures végétales peuvent aussi participer à la diminution des îlots de chaleur. De plus, ce type de toiture permet d'isoler le toit et d'éviter les surchauffes dans les pièces du bâtiment dû au rayonnement du soleil. L'inconvénient à Mayotte est que les fortes pluies imposent d'avoir des toitures à forte pente ce qui rend difficile les plantations.

En compléments de la végétation, la présence de point d'eau près d'un bâtiment va permettre d'abaisser la température de l'air. Par exemple, le système de patio avec un bassin est très efficace car il crée un espace tampon entre l'extérieur et l'intérieur du

bâtiment. En effet la présence d'eau va créer dans le patio un microclimat et rafraîchir l'air qui rentre dans les pièces adjacentes.

### Bénéfices pour l'écoulement des eaux

De plus, la présence de végétation va favoriser l'écoulement des eaux ce qui est primordiale dans des régions cycloniques comme Mayotte où les sols perméables peuvent créer de graves dégâts d'inondation. Ainsi, l'objectif est de minimiser les revêtements en bitume et les remplacer par des matériaux plus perméables.

### Le choix des espèces

La végétation choisie doit être composée d'espèces variées : pelouse, arbustes, tiges et végétation haute pour permettre de superposer les couches végétales et optimiser l'évapotranspiration. De plus, il est important de choisir des espèces adaptées au climat du site pour qu'elles puissent pousser avec le minimum d'entretien. A Mayotte cela permet aussi de protéger et développer les espèces endémiques de l'archipel.

## **2.2.8 L'utilisation des énergies renouvelables et bâtiments autonomes**

L'objectif principal de la conception Bioclimatique est de limiter les besoins énergétiques d'un bâtiment et le rendre autonome. A Mayotte, le soleil étant présent abondamment, il paraît évident d'utiliser cette ressource. Deux systèmes sont principalement utilisés sur l'archipel :

- Les panneaux photovoltaïques : système qui permet de transformer l'énergie solaire en électricité
- Les chauffe-eaux solaires : système qui permet de chauffer un réservoir d'eau à l'aide des rayonnements du soleil.

Ces deux systèmes s'installent sur les toitures. Comme pour les toitures végétalisées, l'inconvénient est qu'ils ne peuvent pas être installés si la pente du toit est trop forte. Lors de la conception d'un bâtiment, il faut trouver un équilibre entre l'écoulement des eaux et la production d'énergie.

## **2.2.9 Le choix des matériaux**

Le choix des matériaux a été évoqué plusieurs fois précédemment : pour réduire l'inertie, les îlots de chaleur et l'amélioration de la ventilation naturelle. En outre, pour limiter l'empreinte environnementale d'un bâtiment, cette décision doit être bien réfléchie. Pour cela différents paramètres sont à prendre en compte.



## L'empreinte carbone des matériaux

On pense tout d'abord aux émissions de gaz à effet de serre. Le laboratoire PIMENT de l'université de la Réunion a réalisé un graphique comparant l'empreinte carbone de constructions réalisées avec 3 techniques différentes (acier, béton, bois) présenté en Figure 22. On peut observer que l'impact du bois est bien plus faible que les deux autres techniques.

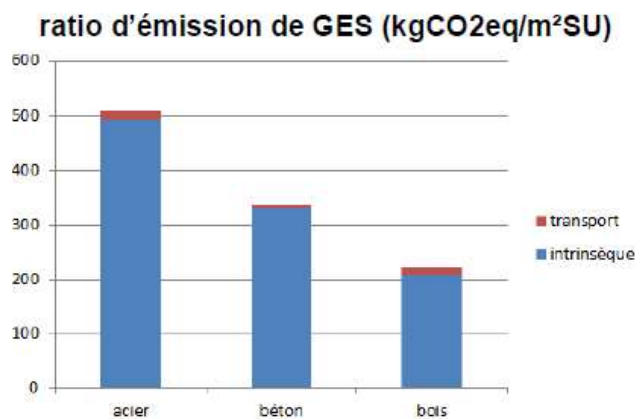


Figure 22 - Comparatif de l'empreinte carbone de trois techniques constructives différentes réalisées à la Réunion

## Développement de l'économie locale

Un autre facteur à prendre en compte est le développement de l'économie locale. En effet, comme le sous-entend la Figure 22, il n'y a pas de production de bois à Mayotte. De plus, les bois provenant de Madagascar ou d'Afrique du Sud sont des bois très résistants mais dont la production coûte très cher à cause de la durée de pousse et de l'entretien. Les essences de bois importés proviennent donc de forêts d'Europe à des milliers de kilomètres en bateau de l'archipel.

Des filières locales tentent de faire leur place à Mayotte pour développer l'économie locale et éviter les importations. Les briqueries qui produisaient la BTC, filière qui a été délaissée aux débuts des années 2000, relancent leur production depuis quelques années à la demande de certains maîtres d'ouvrage comme la SIM et le Rectorat. En parallèle de la production de BTC, d'autres matériaux traditionnels tentent de se développer pour contribuer au développement de l'île. Une association, BAM ! BAMBOU, créée en 2020, effectue des recherches, capitalise les savoir-faire autour de ce matériau et cherche des investissements. Ce bois est intéressant pour ces nombreuses propriétés structurelles : il est très résistant (le bambou est plus performant en compression en traction et en flexion que les bois classiques et le béton), il pousse rapidement et sans aucune difficultés (c'est une espèce dite « invasive »). Pour l'opération construction du lycée des métiers du bâtiment, à Longoni, le Rectorat prévoit de faire construire la maison des lycéens avec une charpente en bambou pour servir de lieu d'expérimentation. Néanmoins, les espèces de bambou présentes à Mayotte ne sont pas les plus adaptées à la construction et à un usage structurel : leurs formes sont irrégulières et le bois est assez sensible aux insectes. Le matériau peut tout

fois être utilisé pour construire des gouttières, de l'isolant ou pour des protections solaires. De même que le bambou, le bananier peut être utilisé en isolants ou en torchis. L'avantage du bananier est qu'une fois le régime de banane récolté il ne peut refaire des fruits et le tronc peut donc être récupéré pour un autre usage.

### Le réemploi

Le réemploi est une notion prépondérante dans la conception Bioclimatique. En effet, elle est la définition même de l'utilisation des ressources locales et permet de réduire la production de déchets et l'empreinte environnementale d'un bâtiment. Cette filière se développe à Mayotte et le Rectorat commence à prendre en main cette notion. En effet, lors de la construction du lycée des métiers du bâtiment à Longoni, le Rectorat a lancé un projet de construction d'un Atelier, appelé Atelier Ya Hazi, réalisé entièrement avec des matériaux récupérés de déconstruction de la mairie de Sada Figure 23. Des éléments comme la BTC et le bois ont pu être récupérés et réutilisés. En plus d'utiliser le réemploi, ce projet était participatif, ce sont les élèves du lycée qui ont en partie construit le bâtiment.



Figure 23 - Atelier Ya Hazi, photo prise par Daman Studio

A la suite de cette opération, le Rectorat s'est lancé dans l'utilisation du réemploi sur la totalité de l'opération de la restructuration du collège de Tsimkoura.

### **2.3 Des référentiels pour construire à Mayotte**

A la suite de l'abandon des techniques traditionnelles pour la normalisation des pratiques, la dépendance de l'île en énergies fossiles a considérablement augmenté et les maîtres d'ouvrage demandent plus de confort dans leurs bâtiments en passant par l'utilisation intensive de la climatisation. De surcroît, Mayotte est un territoire où la construction n'est pas régie par la réglementation thermique, aéraulique et acoustique (RTAA DOM), comme c'est le cas dans les autres DOM TOM. En effet cette réglementation a été rédigée avant la départementalisation de Mayotte. Pour inverser cette tendance, plusieurs acteurs mahorais ont développé des référentiels pour guider les constructions vers une conception Bioclimatique.

La RTAA DOM devrait être adaptée au territoire mahorais pour 2022 mais dans la réglementation actuelle, elle ne serait applicable que pour des opérations de logements et obligerait les constructeurs de logements à répondre à des exigences bioclimatiques.

### 2.3.1 MayEnergie plus

Auteur : ADEME, DEAL, EDM (Electricité De Mayotte), Imageen



Date de parution : 2013

Bâtiments concernés : Logement et tertiaire, neuf et rénovation mahoraise

Type de document : Référentiel, gratuit et libre d'accès

Objectif :

- Inciter les maîtres d'ouvrage à s'engager dans une démarche de développement durable. Impliquer ces derniers dans la lutte contre le réchauffement climatique
- Réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment
- Créer un guide accessible à une majorité d'opération

Contenu :

Environnement du bâti, ventilation naturelle traversante, protections solaire, renouvellement de l'air hygiénique, suivi des consommations d'énergie

Pour chaque rubrique, la charte propose des exigences chiffrées, des conseils et des livrables imposés.

Par ailleurs, pour aider à la compréhension et à l'application de cette charte, des annexes sont jointes avec le document :

- Les données météorologiques de Mayotte
- Des notions théoriques sur le calcul de la porosité des façades, le facteur solaire des parois, les coefficients d'ensoleillement, le dimensionnement des protections solaires, ...
- Des exemples de mauvaises pratiques à éviter
- Un fichier Excel d'aide à la conception

Résultats :

Avec le temps, cette charte est devenue une référence incontournable à Mayotte et une base pour toutes les entreprises de construction de l'île qui veulent agir durablement sur leur territoire. Ainsi, de nombreux maîtres d'ouvrage demandent que cette charte soit respectée à la lettre pendant la totalité de l'opération. De plus ce référentiel a permis aux acteurs de l'île de s'approprier le développement durable dans la construction mahoraise et leurs ouvrir les portes pour développer la conception Bioclimatique.



### 2.3.2 PERENE

Auteur : Conseil régional de la Réunion, Université de Saint-Pierre, Imageen

Date de parution : 2009

Bâtiments concernés : Logement réunionnais

Type de document : Référentiel

Objectif :

- Concevoir des bâtiments qui soient confortables et énergétiquement performants
- Réaliser des économies d'énergie
- Eviter l'utilisation de la climatisation

Contenu :

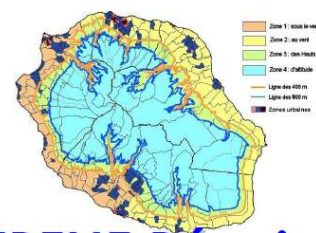
Environnement du bâtiment, ventilation naturelle traversante, protections solaires, renouvellement de l'air hygiénique, suivie des consommations énergétiques.

Pour chaque volet, le référentiel propose des exigences et des livrables définis en fonction d'un zonage. Les résultats demandés ne sont pas les mêmes, si l'opération se trouve plutôt dans les hauts, dans les bas, face au vent ou sous le vent.

De plus le référentiel contient des annexes : les données météorologiques pour chaque zone de l'île, une méthodologie permettant de faciliter certains calculs pour répondre aux exigences.

Résultats :

Mayotte étant proche de la Réunion et avec des climats assez similaires, ce référentiel réunionnais est utilisé implicitement à Mayotte. L'application de PERENE aux constructions mahoraises a tout de même certaines limites. Tout d'abord la météo y est différente. A la Réunion, pendant l'été austral les températures sont moins élevées et il y a plus de vent. La porosité des façades doit donc être plus importante à Mayotte qu'à la Réunion car il y est plus difficile de capter le vent.



**PERENE Réunion**  
PERformances ENERgétiques  
des bâtiments à La Réunion

### 2.3.3 Label HQE addendum applicable aux DOM-COM



Auteur : Afnor, Certivea, CSTB

Date de parution : 2017

Bâtiments concernés : tertiaire dans les départements d'outre-mer, neuf ou réhabilitation

Type de document : Label

Objectif :

- Proposer une labélisation Haute Qualité Environnementale pour les bâtiments tertiaires des outre-mer

Contenu :

Environnement du bâtiment, système et procédés de construction, chantier vert, gestion de l'énergie, gestion de l'eau, des déchets, ventilation naturelle, confort acoustique, confort visuel

Ce document présente l'ensemble des exigences requises pour obtenir la labélisation. Il propose deux niveaux de labélisation avec, systématiquement, deux niveaux d'exigence.

Résultats :

A Mayotte, bien que certains maîtres d'ouvrage aient pu proposer de l'utiliser, aucune opération mahoraise n'a fait l'objet d'une certification HQE.

De plus, le document est moins précis que les deux référentiels présentés ci-dessus et donc montre moins de pertinence.

### 2.3.4 Référentiel du Rectorat

Auteur : Rectorat de Mayotte

Date de parution : 2021

Bâtiments concernés : collèges et lycées mahorais

Type de document : Référentiel

Objectif :

- Développer une stratégie environnementale forte
- Formaliser un outil garantissant la qualité fonctionnelle, environnementale et technique des constructions scolaires du second degré
- Assurer l'égalité des chances du système éducatif et la mise à disposition de structures d'accueil adaptées au contexte territorial et au parcours scolaire
- Guider la Maîtrise d'ouvrage et servir de support de dialogue avec les MOE
- Apporter une réponse homogène pour les différents projets de construction ou de réhabilitation
- Maîtriser en termes de délais et de coûts les engagements de l'Etat

Contenu :

Ce référentiel est décomposé en 5 cahiers :

- Cahier 1 - Référentiel fonctionnel : il contient des outils pour faciliter l'écriture du programme et des fiches fonctionnelles standardisées classées par type de pièce.
- Cahier 2 - Prescriptions de confort d'usage : il présente les objectifs et les moyens à mettre en place pour garantir des équipements confortables pour les usagers. Ce cahier reprend certaines exigences de MayEnergie et PERENE et y ajoute des spécificités liées au domaine scolaire
- Cahier 4 - Prescription technique : il aborde des sujets plus techniques comme les aménagements intérieurs et extérieurs, les structures, les fondations, et les systèmes de réseaux de fluides
- Cahier 5 - Référentiel du management d'opération : définition d'une méthodologie de pilotage des opérations et de concertation à suivre tout au long de l'acte de construction

Résultats

Plus performant que MayEnergie plus et PERENE comme sur les performances énergétiques, l'impact carbone ou la production photovoltaïque.

Ces documents permettront au rectorat de capitaliser les informations en les regroupant dans un même document, figer les avancées et palier aux turn-over.

Le référentiel n'est pas finalisé et n'a encore jamais été mis en pratique.



## 2.4 Exemple de bonnes pratiques, des projets du Rectorat de Mayotte

### 2.4.1 Collège de Bouéni

Le collège de Bouéni, situé un Sud-ouest de l'île (voir annexe 1), est une construction neuve qui a été livrée en 2019. Ce bâtiment remarquable par sa conception Bioclimatique et son adaptation aux contraintes du site (contraintes cycloniques, parasismiques et forte pluviométrie de l'île) a été récompensé du grand prix du trophée « Bâtiment résilient » délivré par l'AQC (Agence Qualité Construction), la MRN (Mission Risques Naturelles) et Construction 21. Ce projet est présenté en image sur la Figure 24.



Figure 24 – Photo du collège de Bouéni, LAB Réunion

Cette opération servira d'exemple dans cette partie pour mieux comprendre le déroulement des études aérauliques et thermiques abordées dans la partie 2.2. Pour rappel, ces études ont pour objectif de servir la conception et valider les hypothèses émises pour assurer le confort dans les pièces.



## 1. CFD du terrain

Le projet a fait l'objet d'une étude aéraulique numérique pour estimer le potentiel de ventilation du terrain en fonction de la topographie et de la rugosité. La Figure 25 représente une coupe dans l'axe Sud-Est/Nord-Ouest de l'île mettant en avant les contraintes topographiques du site. Le bureau d'étude LEU Réunion a pu conclure que le potentiel de ventilation serait de 80% l'hiver et de 50% l'été.



Figure 25 - Coupe su site du collège de Bouéni pour l'étude du potentiel de ventilation naturelle du terrain

Cette étude aéraulique du terrain reste assez rudimentaire et aurait pu être complétée d'une simulation CFD plus précise et plus approfondie prenant en compte les brises thermiques en plus du Kashkazi et des Alizés représentés par les flèches bleues.

## 2. Orientation des bâtiments

Ensuite, en combinant cette première étude avec la course du soleil, la MOE a travaillé pour optimiser l'orientation des bâtiments. La Figure 26 présente sur le plan masse du projet ces deux paramètres. Les bâtiments ont ainsi été orientés afin de limiter l'ensoleillement à l'Est et à l'Ouest et la position incurvée des bâtiments permet de réduire le freinage du vent au moment de l'impact sur les façades et d'avoir une meilleure ventilation naturelle.

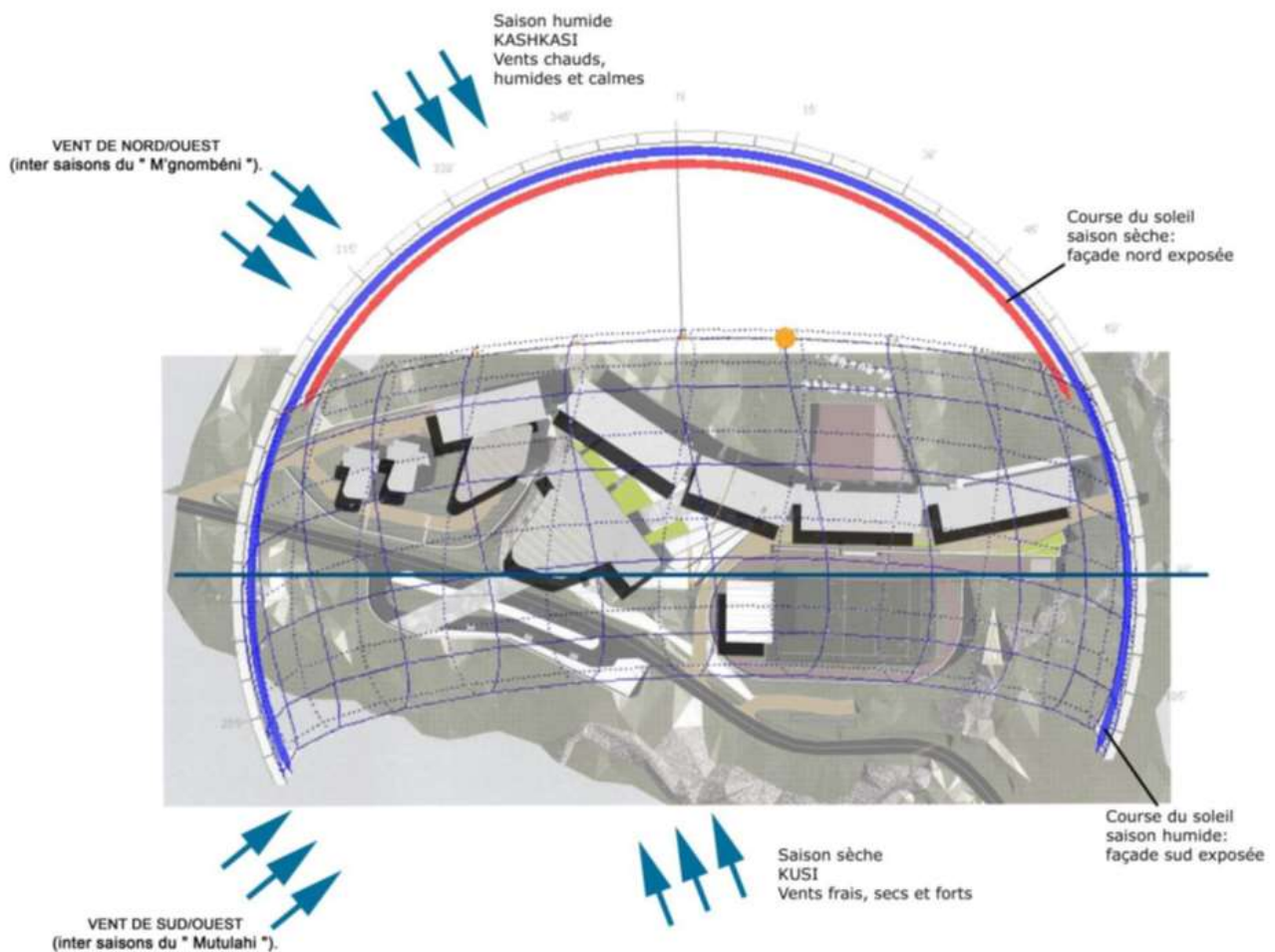


Figure 26 - Etude de la course du soleil et de l'orientation du vent sur le plan masse du collège de Bouéni, Leu Réunion

### 3. CFD du projet, étude en soufflerie et étude de la circulation de l'air entre les bâtiments

Des mesures en soufflerie et une simulation numérique de la circulation du vent sur le projet ont été réalisées pour étudier la ventilation naturelle et la tenue au vent des différents bâtiments. Une photo de la maquette utilisée est présentée sur la Figure 19 à la page 35 du document. Ces études ont permis d'obtenir des résultats concernant la pression sur les façades.

### 4. Simulation thermique dynamique

Des STD ont alors été réalisées dans plusieurs salles choisies stratégiquement du projet (orientation, étage, occupation). Pour réaliser ces STD, la MOE a modélisé le projet (architecture, protections solaires et type de matériaux utilisés) et paramétré les résultats de pressions sur les façades et les données météorologiques (températures extérieures, pluviométrie, rayonnement et course du soleil).

Ces STD ont permis d'obtenir la vitesse de l'air, l'ensoleillement et les températures dans les locaux modélisés.



## 5. Etude du confort

La Figure 27 représente un exemple de résultat obtenu à l'aide des STD. Sur cette figure, on peut observer l'effet de l'ensoleillement sur une façade pour le cas le plus défavorable (le solstice d'hiver) à différentes heures de la journée.

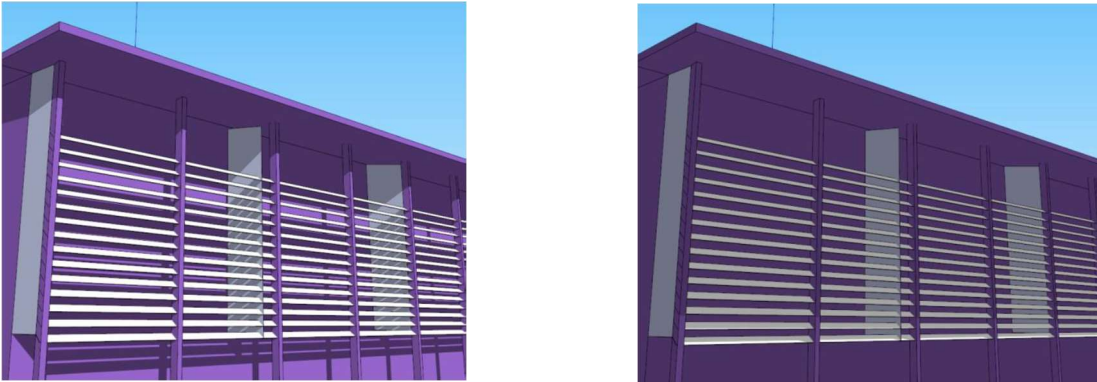


Figure 27 - Simulation de l'ensoleillement sur une façade orienté au Nord à 8h et à 14h le 21 juin, LEU Réunion

De même ils ont obtenu les débits d'air moyens, les températures dans les pièces, les taux d'humidité relative et absolue. Ainsi la MOE a pu en déduire le pourcentage de confort à l'intérieur des salles de classe à l'aide du diagramme de Givoni. La Figure 28 représente un exemple le diagramme obtenu. On observe sur ce diagramme que seulement 5% des points sortent des zones de confort à condition d'avoir au moins 1,5m/s de débit d'air dans la pièce. Ce résultat est relativement faible pour un bâtiment mahorais étant donné le contexte climatique.

### Diagramme de Confort

Salle de classe BatE\_salle2

Période étudiée

Occupation: annuelle de type scolaire

Horaires de 07h00 à 12h00 & 13h00 à 18h00

Pourcentage de temps où l'utilisateur est en confort : 95 %

— zone sans vent à 0 m/s : 7 %

— zone ventilée à 0,5 m/s : 39 %

— zone ventilée à 1,0 m/s : 79 %

— zone ventilée à 1,5 m/s : 95 %

— en conditions hivernales : 0 %

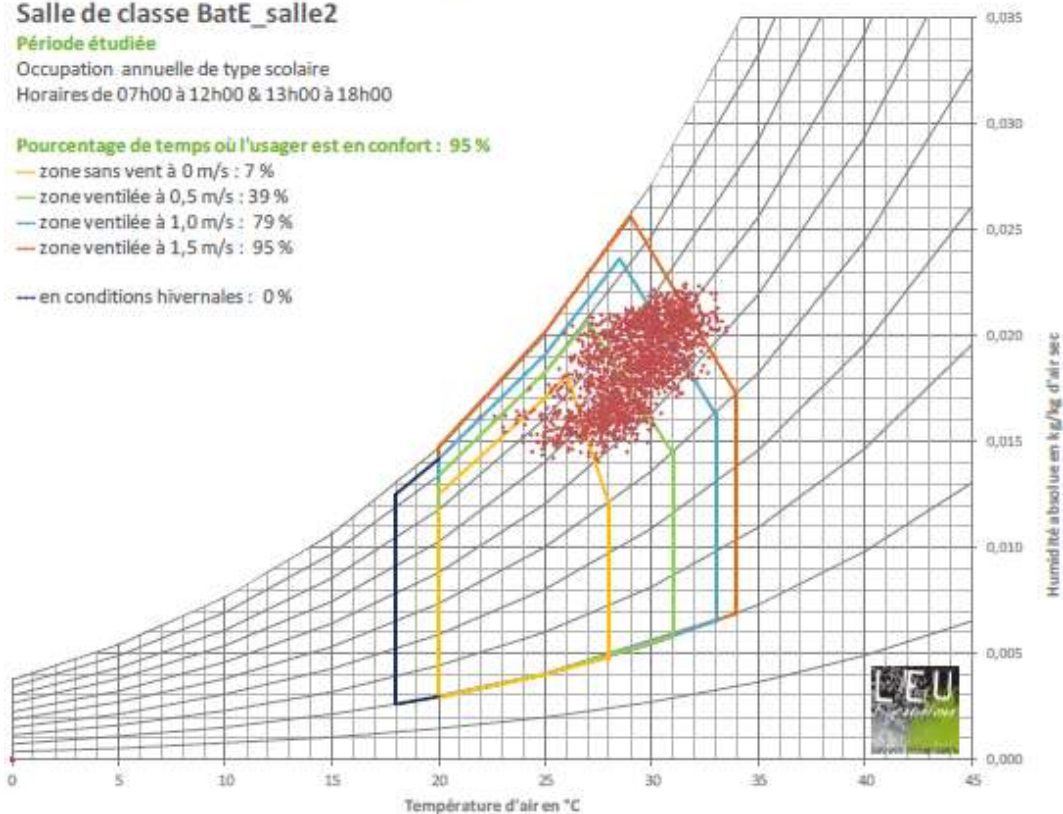


Figure 28 - Diagramme de Givoni obtenu après STD pour une pièce du collège de Bouéni, LEU Réunion

## 2.4.2 Collège Marcel Henri, Tsimkoura

Le collège de Tsimkoura est situé dans le Sud-Ouest de grande Terre. Il a été construit en 1983 par l'architecte Attila Cheyssial et faisait partie des deux seuls collèges de l'archipel. Depuis, il a connu de nombreuses évolutions et des bâtiments se sont ajoutés aux constructions d'origine. La Figure 29 représente une photo des premiers bâtiments. Aujourd'hui, cet établissement fait l'objet d'un programme de réhabilitation mené par le Rectorat de Mayotte, Setec Organisation et le groupement d'architecte : Tand'M et Co-architectes.



Figure 29 – Photo de la cour actuelle du collège avec la présence des bâtiments d'origine

Cette construction est un exemple de l'ambition du rectorat et des moyens qu'ils se donnent pour développer la construction durable sur le territoire. La notion de frugalité y est très présente avec tous d'abord la notion de réhabilitation mais aussi leur volonté de développer la filière du réemploi sur ce projet. En effet, l'enjeu est d'allier neuf et ancien en rénovant les constructions emblématiques du site, présentées sur la photo ci-dessus, démolir certaines constructions en trop mauvais état et construire de nouveaux bâtiments en réutilisant des éléments des démolitions. La démarche de conception bioclimatique était déjà bien présente sur les bâtiments Cheyssial (sur-toitures ventilées, protections solaires, utilisation de la BTC, ...) et, comme pour le collège de Bouéni, celle-ci constitue le fil directeur de la conception de la partie neuve :

- La majorité des locaux seront ventilés naturellement, équipés de brasseurs d'air avec une forte porosité des parois pour permettre d'atteindre le confort dans les salles de classe
- Les bâtiments seront orientés de façon à récupérer le maximum de vent et minimiser le rayonnement direct sur les façades comme le montre la Figure 20 à la page 36.
- Un bouclier solaire sera conçu autour des façades à l'aide de coursives extérieurs protégées, de débords de toitures, de sur-toitures ventilées et de nombreuses autres protections contre le soleil
- La présence de végétation permettra de créer un îlot de fraîcheur visant à réguler la température et offrir de l'ombre aux collégiens. De plus, des espèces de flore



endémiques, indigènes de l'île ou tout du moins non invasives seront choisis et permettront de renforcer la biodiversité et créer une terre d'accueil pour la faune locale.

- L'utilisation du béton sera minimisée au maximum et remplacée par des structures en bois et un remplissage en BTC afin de réduire le bilan carbone globale du projet et développer l'économie locale.

La perspective présentée sur la Figure 30 montre l'aspect qu'aura le collège avec cette symbiose entre le neuf et l'ancien et la présence de la nature.



**Figure 30 - Perspective de la future cour du collège, Tand'M et Co-architecte**

L'équipe chargée de cette opération prévoit une livraison du collège en 2025. Actuellement, ils sont encore en phase de conception. Néanmoins, des simulations et des études similaires à ceux du collège de Bouéni sont prévus.

Ces deux collèges sont des exemples de bâtiment que le Rectorat peut réaliser. Aujourd'hui, l'objectif du Rectorat est d'atteindre ces niveaux d'exigences sur l'ensemble de leurs opérations scolaires. Leur référentiel leur permettra de les aider à atteindre cet objectif.

### **3. Les limites au développement des constructions Bioclimatiques à Mayotte**

La partie précédente présentait la théorie autour de la conception Bioclimatique à Mayotte. Après avoir compris ces méthodes de conception, je me suis intéressée à la pratique et aux écarts de résultat entre la conception et l'exploitation. Au cours de mes recherches, j'ai pu relever certaines contradictions et limites de cette conception. Je me suis ensuite questionnée sur des actions à mener pour palier à ces difficultés et améliorer la démarche.

#### **3.1 Des études sur le confort et le vent peu maîtrisées**

##### **3.1.1 La complexité de prévoir les données de vent d'un terrain**

###### **Le manque de station météorologique**

Les données aérodynamiques constituent la base pour concevoir des bâtiments avec de la ventilation naturelle. Comme expliqué dans la partie 2.2.3, à Mayotte la seule station fournissant des données météorologiques se trouve à l'aéroport de Pamandzi, au nord Est, sur Petite Terre. Tout d'abord, la topographie à cet endroit est légèrement différente que sur Grande Terre. En effet, sur l'annexe 1, on remarque que l'altitude sur cette partie de l'île ne dépasse pas les 200m et l'aéroport se trouve sur une zone très proche du niveau de la mer. Cela va permettre à Pamandzi de recevoir particulièrement bien le Kashkazi pendant l'été austral et les Alizés pendant l'hiver austral car le relief ne forme pas d'obstacle. De plus, Petite Terre n'étant pas très étendue, on peut penser que les brises thermiques sont plus faibles que sur Grande Terre.

En comparaison, sur l'île de la Réunion, Météo-France dispose de 67 stations automatiques qui mesurent les précipitations au pas de temps horaire et dont 16 mesurent le vent à 10m de haut. Le Référentiel PERENE a recueilli ces données et présente un zonage du territoire réunionnais permettant de distinguer 4 zones, détaillées sur la Figure 31 en fonction de leurs altitudes et leurs orientations par rapport au vent :

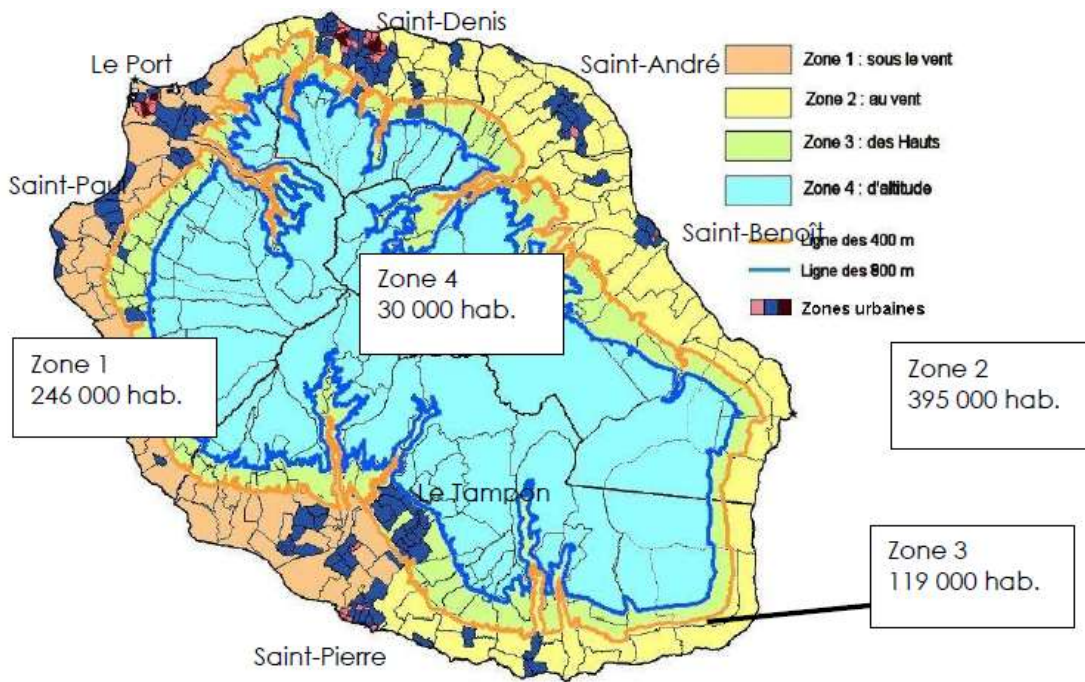


Figure 31 - zonage thématique, référentiel PERENE

Les préconisations et les exigences de PERENE sont plus précises et variées en fonction de la zone étudiée. Par exemple le taux de porosité ne sera pas la même que l'on soit dans la zone 1 ou dans la zone 3. Un zonage comme celui-ci serait très intéressant à Mayotte mais pour cela il faudrait équiper le département de mâts de mesure des vents et des stations météorologiques. Pour obtenir ces données, les acteurs et maîtres d'ouvrage pourraient investir dans l'installation de mâts de mesures afin de commencer la collecte d'information et faire avancer les recherches sur la conception Bioclimatique.

### La complexité de l'étude des brises thermiques

L'étude des brises de vent, dépend entièrement de la localisation du terrain et doit être réalisée à part de l'étude du Kashkazi et des Alizés. En théorie, l'étude de ces brises semble assez simple : ces vents sont « perpendiculaires » à la côte océanique. Mais en réalité, la géographie irrégulière de Mayotte rend le travail plus compliqué. En comparaison, la prédiction des brises thermiques à la Réunion pose moins de problème. La forme de l'île est assez simple (circulaire), tant dis que Mayotte est composée de baies et de presqu'îles.

### Le manque de preuve de fiabilité des études aérauliques

A ce jour, aucune opération de construction mahoraise ayant réalisée des études aérauliques numériquement n'a encore été livrée. Par conséquent, il n'y a encore aucun retour sur la justesse des méthodes.

Ce manque de fiabilité semble plus ou moins résolu à la Réunion, où des opérations de construction ont fait l'objet de CFD et de bons résultats ont été obtenus. La fiabilité de

la méthode a été prouvée sur d'autres régions du monde, le point bloquant à Mayotte est bien la distance de la station de Pamandzi vis-à-vis du reste de l'archipel.

Cette difficulté, obtenir des valeurs de vitesse et d'orientation de vent justes, est un problème général dans le monde entier. L'étude du vent est une science très complexe. Globalement, si le bâtiment ne se trouve pas à proximité d'un aéroport ou une station météorologique, il est rare d'avoir des données parfaites lorsqu'elles sont obtenues avec une démarche numérique. La méthode expérimentale avec l'instrumentalisation de la parcelle, tel que l'installation d'un mât de mesure, sera toujours considérée comme la méthode la plus fiable.

### **3.1.2 L'étude du confort**

#### **De grandes exigences pour assurer le confort intérieur des établissements scolaires**

Afin de pallier aux manques de fiabilité des études aérauliques et assurer le confort dans les pièces, le Rectorat et les équipes qui l'entoure doivent avoir une stratégie environnementale très forte et assurer le respect de celle-ci tout au long du projet. Pour des opérations d'une certaine taille, comme la construction de collège et de lycée, avec des ambitions de réaliser un rafraichissement passif, il semble obligatoire de réaliser des CFD et STD. De fortes exigences sur les rendus de simulation thermique et aéraulique doivent être définis :

- A mon sens, l'étude des vents sur un terrain et la définition du potentiel de ventilation naturelle devrait être réalisée avant la rédaction du Programme pour que ces résultats puissent être pris en compte dans le document. Ces études vont permettre de prévoir au mieux les point faibles et points forts d'un terrain et d'une architecture afin d'adapter les exigences en fonction du potentiel de ventilation. Par exemple, le taux de confort requis sera plus élevé s'il y a beaucoup de vent sur la zone étudiée.
- Si l'étude du potentiel de ventilation naturelle n'a pas pu être réalisé avant le démarrage de la conception, le maître d'ouvrage devrait se laisser la possibilité de faire évoluer cette exigence au cours des études.
- En phase concours, une étude CFD pourrait être demandée dans le dossier Esquisse et être prise en compte lors du choix du groupement de maîtrise d'œuvre. Cette étude donnerait un aperçu de la circulation de l'air entre les bâtiments et une idée de l'efficacité de la ventilation naturelle.

Une fois les CFD et STD réalisées, l'équipe de conduite d'opération doit porter un œil attentif aux hypothèses prises par la MOE. Par exemple, l'environnement du bâtiment doit être pris en compte dans la modélisation du projet dans le logiciel de simulation (la végétation, les bâtiments environnants, etc.) et cette précision doit figurer dans le programme. De plus, jusqu'à aujourd'hui, les STD ne prennent pas en compte les effets de la végétation sur la température extérieure grâce à l'évapotranspiration. Ce



paramètre est indispensable dans l'étude du rafraîchissement passif des bâtiment et il serait pertinent d'étudier la possibilité de développer ce point dans les STD des futures opérations.

### La recherche du confort : un équilibre à trouver entre température, débit d'air, luminosité, acoustique

Le calcul du confort s'obtient à l'aide du digramme de Givoni qui lui-même dépend de la température, de l'humidité et de la vitesse de l'air. Il est difficile de modifier l'humidité car celle-ci dépend de la météo, en revanche on peut jouer sur les deux autres paramètres. Concernant la vitesse de l'air, on peut l'augmenter avec une bonne localisation et une ventilation naturelle efficace. De son côté, la température se régule avec, par exemple, des protections solaires, une isolation et la végétalisation des abords.

Néanmoins, le diagramme de Givoni n'étudie que le confort hygrothermique. Dans la conception du bâtiment, il ne faut pas oublier le confort olfactif, visuel et acoustique :

- Le confort olfactif s'obtient avec un bon renouvellement de l'air qui est très bien réalisé par la ventilation naturelle. Tous de même, il faut faire attention aux sources de désagrément extérieurs (assainissement, déchets, pollution, ...)
- Pour atteindre le confort visuel il faut limiter les zones d'éblouissement sans trop réduire les apports en lumière naturelle. Les protections solaires limitent les surchauffes et peuvent, en même temps, empêcher la lumière naturelle de rentrer. Une analyse de la luminosité et de l'éblouissement doit être réalisée lors du choix des brises solaires afin de trouver un compromis entre confort visuelle et confort hygrothermique.
- Le confort acoustique peut lui aussi être affecté par la conception Bioclimatique. En effet la grande porosité des façades et la présence d'ouvrants vont à l'encontre des corrections acoustiques. En effet, celles-ci ont pour but d'isoler l'intérieur des nuisances extérieures ce qui perd complètement son sens si on ouvre les façades. L'équilibre entre confort acoustique et confort hygrothermique est donc difficile à trouver. L'absence de réglementation acoustique à Mayotte laisse libre le choix aux maîtres d'ouvrage d'avoir des exigences sur ce sujet. La demande de corrections acoustiques contraint fortement la ventilation naturelle et la porosité des parois, il est peut-être préférable d'accepter l'absence d'exigences acoustiques afin de valoriser la conception Bioclimatique du bâtiment et privilégier le confort hygrothermique. Néanmoins, le confort acoustique est primordial pour avoir de bonnes conditions d'apprentissage. Il est possible de limiter les nuisances sonores en aménageant astucieusement le terrain et en apportant une correction sur les parois intérieures des bâtiments afin de limiter les bruits de choc et les nuisances d'une salle à l'autre. Si une position en faveur de la ventilation naturelle est prise par le Rectorat de Mayotte, celui-ci doit le mentionnée dans le Programme. Cela facilitera les prises de décision des MOE dans leurs études et leur permettra de

se diriger dès le démarrage de la conception vers une grande porosité des façades plutôt qu'une forte correction acoustique.

Les STD, réalisée en phase conception, vont permettre de mesurer ces 4 types de confort dans le bâtiment et gérer l'équilibre entre porosité des façades et protections solaires. Cette étape doit être minutieusement suivi par les équipes de maîtrise d'ouvrage afin de valider les compromis et assurer le respect des objectifs.

### **3.1.3 Les limites de certains référentiels**

#### Les limites de la charte MayEnergie

La charte May Energie a été rédigée pour guider l'ensemble des maîtres d'ouvrage mahorais. Les rédacteurs de la charte ont dû faire des choix pour simplifier leurs exigences et éviter de trop contraindre les porteurs de projet. Tous d'abords, il n'oblige pas à réaliser des STD et des CFD et proposent de justifier leurs résultats à l'aide d'un Excel proposé avec le référentiel. La vérification de ces données sera faite uniquement en phase étude, il n'y a pas d'exigence de résultat et de vérifications en phase de travaux et exploitation.

De plus, dans le cas où ces simulations sont réalisées, May Energie n'émet d'exigences que sur la modélisation du bâtiment en elle-même et ne demande pas spécifiquement de prendre en compte l'environnement et les effets de masques. Cela peut entraîner des conséquences sur les résultats des études aérauliques et sur le dimensionnement des protections solaires. En effet, la présence de bâtiments voisins, par exemple, peut ralentir le vent et priver une pièce de ventilation naturelle. Sans anticiper ce phénomène, la pièce sera dimensionnée comme si elle avait accès à des vents rapides, plutôt que d'anticiper le manque de ventilation traversante en renforçant le calepinage des brasseurs d'air et surdimensionner le taux d'ouverture des façades. En outre, il est déjà arrivé que les modélisations en prenant en compte l'environnement montrent qu'un bâtiment voisin créait de l'ombre sur la construction. MayEnergie plus exigeant un taux de protections solaires sur toute les façades, le bureau d'étude en charge du projet a été obligé d'ajouter des brises solaires supplémentaires pour répondre au référentiel et engendrer un surcoût dû à l'installation de ces équipements. Dans une recherche de frugalité, l'ajout de protections intempéstifs va à l'encontre de la notion de Bioclimatisme. Ainsi il est important d'aller loin dans le détail de la modélisation pourrait coller le plus possible à la réalité et éviter les écarts.

Certaines notions prépondérantes dans la construction durable et l'utilisation de la ventilation naturelle traversante sont absentes du référentiel. Par exemple, les notions d'épaisseur des bâtiments et de compacité ne sont pas abordées, pourtant cela manquerait de sens de réaliser de la ventilation traversante dans un bâtiment très épais. Le vent entrant dans les pièces y serait énormément ralenti par l'aménagement et la sensation de fraîcheur ne pourrait se produire.

En règle générale, le fil directeur de ce référentiel est l'économie d'énergie et la recherche d'autonomie énergétique. Cependant, pour construire durablement à Mayotte, ce thème ne doit pas être le seul à être abordé et il pourrait être complété par la notion de bilan carbone, d'utilisation de matériaux biosourcés et de développement de l'économie locale.

### L'utilisation de label

Pour approfondir le volet environnemental des opérations, les maîtres d'ouvrage s'intéressent à des labels et sont tentés de demander une certification. Ces documents sont intéressants et permettent d'approfondir la conception des bâtiments en faveur du respect de l'environnement. Néanmoins, il existe peu de labels compatibles avec le contexte mahorais. Celui auquel on pense majoritairement à Mayotte est le label HQE avec son addendum applicable aux DOM-COM. Néanmoins, ce document reste largement moins aboutis que le référentiel MayEnergie plus ou le référentiel des collèges et des lycées et ne permet pas, à lui seul, de concevoir un bâtiment Bioclimatique efficacement. En plus de ne pas faire l'objet d'une preuve de la qualité du bâtiment, la certification demande du temps et par conséquent un investissement financier non négligeable. Il faudrait consacrer environ 200 000 € de budget pour réaliser les démarches administratives, les études complémentaires et organiser une visite du site avec un expert. Cette argent pourrait être consacré à développer des aspects du projet comme l'ajout de panneaux solaires supplémentaires, par exemple. Ce label apportera peut-être de la visibilité au projet mais ne sera pas forcément un gage de qualité aux vues des faiblesses du document. C'est sûrement pour ces différentes raisons qu'aucun projet mahorais n'a fait l'objet d'une labélisation.

## **3.2 Des ressources locales limitées**

### **3.2.1 Foncier**

#### Des difficultés liées aux terrains

Avant de se lancer dans la construction d'un bâtiment, il faut sélectionner un terrain. Cette étape qui semble assez évidente ne l'ai pas forcément à Mayotte. Le prix du foncier a beaucoup augmenté depuis la départementalisation. Ensuite, un problème récurrent sur cet archipel est de ne pas retrouver les propriétaires d'un terrain pour racheter la parcelle. Il faut alors faire appel à des généalogistes qui vont tenter de chercher l'héritier. Si cela n'aboutit pas, une démarche d'expropriation contre « inconnu » doit être réalisée. Ces démarches administratives pour racheter des parcelles sont des facteurs qui vont ralentir les projets et prolonger les délais avant le commencement des travaux.

De surcroît, la topographie mahoraise ne facilite pas les constructions. Ces terrains sont souvent décrits comme inconstructibles ou sont considérés comme des parcelles agricoles selon les documents d'urbanismes. Dans le cas de la construction d'un



bâtiment scolaire, le caractère d'utilité public rend les démarches pour changer l'état d'une parcelle plus faciles (rendre une parcelle agricole en une parcelle constructible). Le foncier est devenu si rare que les mahorais sont obligés d'avoir recours à ce type de démarche et ainsi construire sur des terrains avec des pentes élevées ou au bord des ravines. On peut rajouter à cela, tous les risques climatiques qui obligent les constructeurs à jouer sur des zones à fort aléas mouvement de terrain ou inondation. Au moment du choix du terrain, ces facteurs ne sont pas toujours connus, ils sont découverts au fur et à mesure de la conception. Cela peut remettre en cause un projet ou demander de nombreuses études supplémentaires pour analyser la constructibilité d'un terrain. Tous ces contretemps vont retarder les opérations, augmenter les coûts de conception et de construction et fragiliser les ambitions de conception de bâtiments respectueux de l'environnement.

De plus, la différence entre Mayotte et la métropole ou la Réunion est que le territoire est peu urbanisé. Il faut prévoir de relier la parcelle à l'ensemble des réseaux : fluide, électrique, routier. Ces opérations sont donc souvent à compter en plus dans le budget et complexifient le phasage des travaux. Un travail sur la gestion du budget, des risques et du planning est donc primordial.

### Le choix du terrain

Les terrains constructible et sans grosses contraintes techniques deviennent très rares. Il est compliqué d'ajouter des exigences aérauliques au choix du terrain et sa capacité à accueillir un bâtiment fonctionnant efficacement avec un système de rafraîchissement passif. Cependant, pour développer une stratégie environnementale basée sur la ventilation naturelle dans un projet, le choix d'un terrain avec la présence abondante de vent est indispensable et dans ce cas, des études aérauliques doivent être réalisées avant le choix du site. Si ce choix, basé sur l'aéraulique est irréalisable, il serait néanmoins, important de juger de la qualité du terrain avant le début de la rédaction du programme. Cela éviterait de lancer un projet avec des démarches environnementales très fortes sur un terrain inadapté où la recherche de confort est trop complexe et ainsi adapter les exigences du programme en fonction des possibilités du terrain.

### 3.2.2 Importations de la matière

#### Dépendance aux importations

Le département de Mayotte est un petit territoire insulaire de 374km<sup>2</sup>, presque 7 fois plus petit que la Réunion. Ces îles ne lui permettent pas à lui seul de subvenir aux besoins de ses habitants. En effet, en 2020 l'importation était de plus de 700 000 milliers d'euros contre seulement 6 400 milliers d'euros d'exportation.

Les filières du bâtiment ne font pas exception et la quasi-totalité des matériaux nécessaires pour la construction proviennent de l'extérieur. Ce secteur, fortement corrélé avec la commande publique et qui évolue en fonction de la croissance démographique, représentait 15% de la création des richesses mahoraises en 2017. Pour illustrer l'importance de ce secteur dans l'économie locale et les importations, on regarde la quantité de ciment importer dans l'année. Celle-ci était de 113 259 tonnes en 2020 et a augmenté de 41,3% en un an. Les constructions qui se veulent respectueuses de l'environnement comme celles du Rectorat de Mayotte ne peuvent être réalisées sans avoir recourt à l'importation. Actuellement, il semble que seule la filière de la BTC soit assez développée pour répondre aux projets de grandes envergures du Rectorat, mais comme expliqué précédemment, les caractéristiques de ce matériau restent trop faibles pour constituer une structure capable de résister aux aléas.

#### La gestion des déblais

En parallèle de la demande en matériaux, la topographie de l'île oblige les professionnels du secteur à terrasser les pentes. Une question se pose alors : que faire de ces déblais ? Dans la limite du possible, l'idéal est de les réutiliser en tant que remblais. Cela implique que le terre ne soit pas polluée et avec de bonnes propriétés. Malheureusement, à Mayotte, le besoin de terrasser est plus important que celui de remblayer et l'augmentation des constructions à Mayotte implique avec elle l'augmentation du volume de déblais produits. Actuellement, Mayotte ne pouvant stocker ces volumes, il semblerait que les terres déblayées non réutilisées terminent sur des cargos afin d'être exportées vers d'autres territoires (sans doute l'Inde, Madagascar ou l'Asie). Pour éviter cela, il faut limiter le terrassement, ce qui demande des compétences techniques et des coûts supplémentaires.

## Des conséquences sur le coût des matériaux

On constate que la vie à Mayotte est très chère, le prix des matériaux de construction est 35% plus élevé qu'en métropole et le béton y est deux fois plus chère qu'à La Réunion. Ces différences sont dû :

- A l'entière dépendance de l'archipel au commerce internationale et l'éloignement des sources d'approvisionnement
- Au prix du transport
- Au petit marché mahorais et au manque de concurrence expliqué par la présence de grand groupes dominant le secteur
- Aux difficultés de stockage : rareté du foncier, manque d'entrepôts
- A la difficulté de certifier les produit locaux dû à l'absence d'organisme de certification sur place : la BTC n'a obtenu son ATEx (Appréciation Technique d'Expérimentation) par le CSTB qu'en 2018 alors qu'elle est utilisée depuis 1980.

De plus, il est très difficile d'estimer l'évolution des prix des matériaux. Par exemple, la crise du COVID a provoqué une violente augmentation des prix, des importations et dont ces conséquences restent encore à venir. D'autres conséquences de ce type ont eu lieu par le passé et surviendront à nouveau à l'avenir, d'autant plus avec le dérèglement climatique. Ce manque de prévision a de lourdes conséquences sur le coût d'une opération de construction qui peut doubler entre la phase programme et les travaux.

### 3.2.3 Quel conséquences pour les opérations du Rectorat ?

#### Leur choix d'opter pour des matériaux locaux

Pour développer les filières locales, le Rectorat se veut être moteur et exige l'utilisation de matériaux locaux dans ses opérations. Des exigences en termes de quantité de matériaux bois, par exemple, à utiliser dans les structures devrait être intégrées dans tous les programmes pour amorcer une réduction du bilan carbone des opérations. Pour cela, il doit accompagner les acteurs mahorais dans la création de site de production pour qu'ils puissent répondre à leur demande.

#### De futurs problèmes d'approvisionnement en BTC

Aujourd'hui, le nombre de projets incluant l'utilisation de BTC explose et les rares briqueries produisant ce matériau sur Mayotte ne suffiront sans doute pas pour approvisionner l'ensemble des chantiers. De plus, la BTC étant très sensible à l'humidité, il semble très compliqué de créer des stocks pour anticiper les futures difficultés. Par conséquent, en l'état actuel et avec les entreprises présentes sur l'archipel, on peut prévoir de gros ralentissement de travaux et des décalages des réceptions de chantier pour cause de manque d'entreprises produisant ces briques.

## Les enjeux pour les constructions à venir

L'enjeu, dans le futur, sera de palier aux difficultés liés à l'approvisionnement de la BTC où autre matériaux locaux sans avoir massivement recours à de grosses entreprises métropolitaines pouvant produire de manière intensive les produits manquants. Faire appel à ce genre d'entreprise pourrait palier aux différents problèmes que rencontrera le département mais pourrait aussi avoir de lourdes conséquences sur l'économie locale. Potentiellement, les producteurs mahorais de BTC ne pourraient pas produire au même prix que ces géants de la construction et devront mettre la clé sous la porte s'ils ne sont plus sollicités. Ainsi, un équilibre est à trouver pour favoriser le développement des entreprises locales sans compromettre le bon déroulé des projets.

### **3.2.4 Le manque d'acteurs compétents sur place**

En parallèle des besoins en matériaux, Mayotte manque d'entreprises et de savoir-faire. Le secteur de la construction dépend en grande partie de grands groupes français d'ingénierie. De plus, ces derniers sont formés pour répondre à des appels d'offre métropolitaines et non au territoire mahorais. Pour prendre le cas du Bioclimatisme, on trouve finalement peu d'ingénieurs spécialisés dans ce domaine et encore moins spécialisé dans la conception durable à Mayotte. La forte dépendance de l'archipel aux ingénieurs métropolitains s'explique, en partie, par l'investissement tardif de la France à Mayotte. Lors de mon stage, je me suis rendue compte de la mince proportion de mahorais dans ce secteur, même au sein des maîtres d'ouvrage et des institutions départementales, la majorité des personnes sont des expatriés métropolitains. Pour combler ce manque de savoir-faire, les porteurs de projets font appel à des entreprises qui ne sont pas forcément installées sur l'île. Setec en est un très bon exemple, deux de ses filiales : setec organisation et setec international, sont installées à la Réunion et se déplacent ponctuellement à Mayotte pour y réaliser des missions. Ce cas n'est pas une exception, la quasi-totalité des entreprises mentionnées dans ce rapport sont réunionnaises ou métropolitaine et ont profité du développement de Mayotte pour agrandir leur activité : certains d'entre eux ont des employés installés sur le territoire, et d'autres ne sont ni à Mayotte ni à la Réunion et travaillent entièrement depuis la métropole ce qui les oblige à réaliser des déplacements professionnels France-Mayotte régulièrement. Ces déplacements, que ce soit depuis la métropole ou depuis la Réunion, ne sont pas sans conséquences sur le bilan carbone des opérations. Pour avoir un ordre d'idée, Setec organisation a prévu des allers-retours pour le chargé d'opération responsable des missions à Mayotte en moyenne tous les mois. En multipliant ce chiffre à l'ensemble des acteurs non présents sur le territoire, on obtient un taux non négligeable.

## Le manque d'attractivité de l'île

Pour pallier le manque de savoir-faire locale, ces derniers doivent employer des métropolitains avec les compétences recherchées. Malheureusement, le territoire semble ne pas être apprécié de tous en partie à cause de l'insécurité qui y règne, du retard de développement économique et de l'absence de service. Cela explique pourquoi nombre d'entreprises préfère travailler à distance.

Concernant les sociétés présentes à Mayotte, leurs employés ne sont pas préparés aux difficultés du territoire et on y observe un fort taux de turn-over dans les équipes. Dans la fonction publique, à Mayotte, un fonctionnaire reste en moyenne 3 ans en poste avant de repartir en métropole. Avec des changements d'équipe si réguliers, il est difficile pour eux de capitaliser et de gérer des opérations sur le long terme efficacement.

## Des bénéfices à tirer de la crise du Covid 19

La crise sanitaire de la Covid 19 a permis de développer d'autres formes de communication et de rapport entre les entreprises. En effet, la fermeture des frontières a limité les déplacements et a contraint les acteurs à organiser des réunions à distance, en visioconférence. Les déplacements rendus plus exceptionnels sont aussi devenus plus efficaces. Néanmoins, cette diminution des rencontres n'est pas sans conséquences sur la partie relationnelle entre les différents acteurs d'une opération. En effet, les réunions derrière un écran ne pourront remplacer celles en présentielles. La partie informelle de ces rencontres joue un rôle clé dans l'avancement et le bon déroulement d'un projet. Les répercussions sur les déplacements, comme ceux qui se sont produits au cours de cette crise, seront amenés à se reproduire à l'avenir avec le dérèglement climatique. Afin d'éviter ces contraintes et incertitudes, les entreprises doivent se doter d'une entité sur place et ne plus dépendre du transport aérien. Cela permettrait aussi de créer de l'emploi et de partager leurs savoir-faire aux mahorais. De nouvelles entreprises locales pourraient alors voir le jour et réduire la dépendance de Mayotte à la métropole.

### **3.3 Le manque de retour d'expérience**

#### **3.3.1 Le manque de preuve concernant la fiabilité de la conception Bioclimatique à Mayotte**

Pour aller plus loin dans la démarche de Bioclimatisme à Mayotte, il faut se servir des erreurs réalisées par le passé et en tirer des conclusions pour améliorer les conceptions des bâtiments. Ainsi, il est important de réaliser des analyses des constructions une fois les bâtiments livrés et exploités.

##### **Les retours d'expériences de l'ADEME**

L'ADEME a réalisé 2 retours d'expériences en 2012 et 2020 dans le cadre de la rédaction des référentiels MayEnergie et MayEnergie plus. Le premier rapport analysait la construction à Mayotte en général et faisait un état des lieux afin d'améliorer le référentiel en vue de la rédaction de son évolution en 2013. Le second retour d'expérience a été rédigé 7 ans après la parution de May Energie plus, en 2020. Néanmoins, l'ensemble des 10 opérations de logements étudiées respectaient la charte de 2009 et non sa mise à jour de 2013. Les exigences ayant changées d'une version à l'autre, ce retour d'expérience ne fait pas l'œuvre d'une analyse des améliorations de la conception bioclimatique.

Cette étude a été menée sur plus de 200 logements réalisés par la SIM. Des résultats sur la consommation d'énergie et des observations des constructions ont été obtenues. Ces résultats sont assez négatifs sur la conception et l'aménagement des bâtiments mais au vue de la date de construction des habitations, on ne peut pas affirmer que des évolutions ont été faites. De plus, une étude aux prêt des occupants a été réalisée et mes en lumières les usages que font les occupants des systèmes de ventilation naturelle et de l'utilisation de la climatisation.

Ces deux retours d'expériences représentaient les seuls études de ce genre réalisées à Mayotte jusqu'en juillet 2021 et celles-ci ne concernaient que des logements. Ce manque de retour d'expérience ralenti l'avancement de la construction durable à Mayotte et empêche les porteurs de projet de mettre en lumière les points bloquants. La démarche de MayEnergie reste intéressante mais elle ne permet pas de conclure sur l'efficacité de la ventilation naturelle et de la bonne conception des logements. Quant au domaine tertiaire, le premier rapport d'analyse d'exploitation a été réalisé en juillet 2021 par le Rectorat de Mayotte. Cette études porte sur des établissements scolaires dans l'optique de fournir des données pour la rédaction de leur référentiel des collèges et des lycées.

## Réaliser des études en phase exploitation dans les établissements du rectorat

Le référentiel des collèges et des lycées du rectorat contient un volet suivi en exploitation dans le cahier 2 (Prescription sur le confort d'usage). Il demande aux groupements en charge de la conception et construction des projets de réaliser un suivi des paramètres de confort en phase exploitation, d'analyser les résultats et les écarts obtenus par rapport aux études (en phase programme et conception) et d'engager des actions correctives si besoin. Des rapports de synthèse devront être rédigés 3 mois, 6 mois et 1 an après la réception afin d'obtenir des résultats permettant de conclure sur l'efficacité de la conception Bioclimatique tout au long de l'année.

De plus, le Rectorat de Mayotte souhaite s'entourer d'un assistant à maîtrise d'ouvrage spécialisé dans la conception durable. Ce nouvel acteur les aidera, notamment, dans l'analyse des rapports d'exploitation et leur proposera des évolutions de leur stratégie environnementale en fonction des résultats obtenus.

### **3.3.2 Des premiers résultats sur la conception bioclimatique des collèges et lycées**

#### **Présentation de l'étude**

Comme évoqué précédemment, en juillet 2021, dans le cadre de la rédaction du référentiel de la construction des collèges et des lycées à Mayotte, le Rectorat a mandaté deux bureaux d'étude (Menighetti parvis et In'Terra) pour réaliser des mesures du confort hygrothermique dans 5 établissements scolaires :

- Le lycée de Dombéni, construit en 2011
- Le collège de Kwalé, construit en 2015
- Le lycée de Mamoudzou Nord, construit en 2016
- Le collège de Ouangani, construit en 2017
- Le collège de Bouéni, construit en 2019

En supposant qu'il faut compter entre 3 et 5 ans entre le lancement d'une opération et sa livraison et aux vues des dates de livraison de ces différents établissements, on peut supposer que :

- Le lycée de Dombéni n'a pas suivi le référentiel MayEnergie publié en 2009,
- Le collège de Kwalé et le lycée de Mamoudzou Sud ont suivi le référentiel MayEnergie mais pas sa mise à jour publié en 2013
- Le collège de Ouangani et le collège de Bouéni ont suivi le référentiel MayEnergie plus.

De plus, il est important de noter que seul le collège de Bouéni (présenté dans le paragraphe 2.4.1) est construit avec une structure bois et conçu afin d'abaisser au maximum l'inertie du bâtiment. Les autres établissements sont construits en béton.



Pour réaliser cette étude, les deux bureaux d'étude ont mesuré, pour chaque établissement, la température de l'air, l'hydrothermie, la luminosité à l'intérieur de salles de classes choisis stratégiquement, ainsi que la température et l'hydrothermie à l'extérieur. Les données ainsi récoltées, ils ont analysé pour chaque local le diagramme de confort de Givoni annuel pendant les heures d'occupation (7h-18h), le nombre d'heure annuel ou la température dépasse 30°C et les surchauffes moyennes (différence entre la température intérieure et la température extérieure).

En résumant les résultats obtenus ont obtenu les diagrammes présentés en Figure 32 et Figure 33.

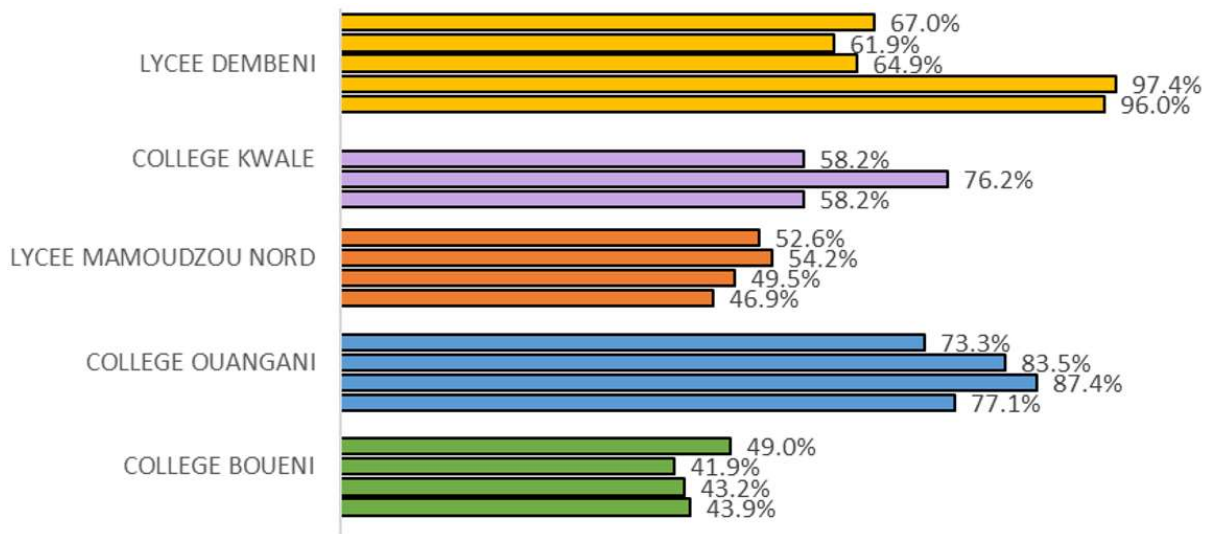


Figure 32 - taux de confort de Givoni en occupation dans les locaux instrumentés, Menighetti Parvis et In'Terra

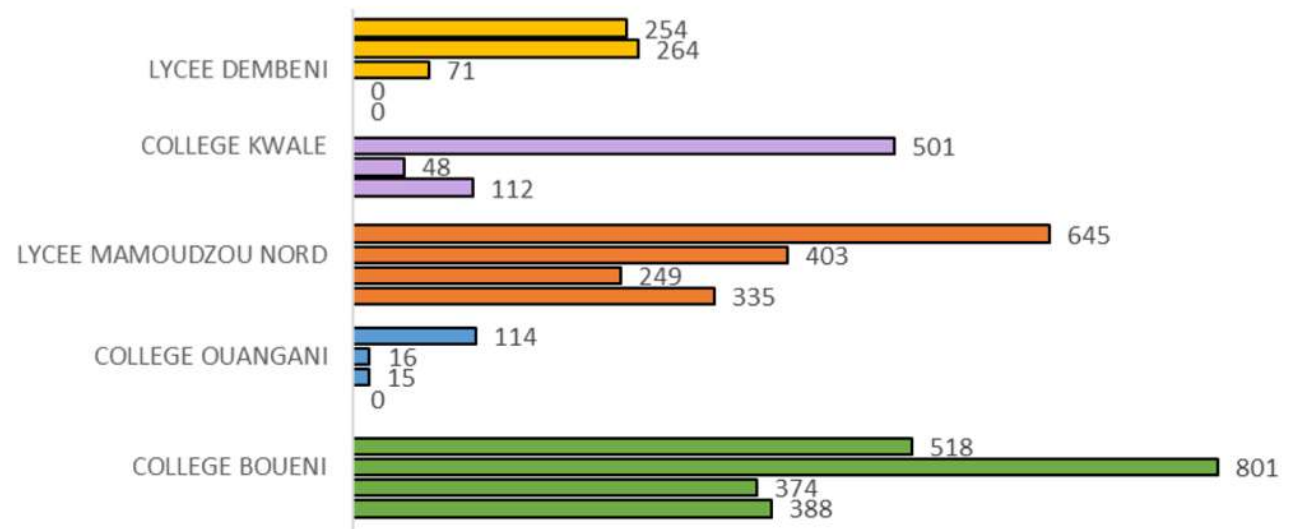


Figure 33 - Nombres d'heures où la température intérieure est supérieure à 30°C pendant les horaires d'occupation dans les locaux instrumentés, Menighetti Parvis et In'Terra

## Analyse des résultats

Sur ces figures, on constate que deux salles instrumentées ont des résultats particulièrement bons dans le lycée de Dembéni. Elles sont à étudier à part du reste car elles correspondent à des chambres d'internat et donc elles ne sont occupées que la nuit et ne reçoivent pas les mêmes apports de chaleur.

D'après les résultats sur le confort (Figure 32), on observe de bons résultats avec le collège de Ouangani qui, avec l'aide du référentiel MayEnergie plus, a bénéficié d'une très bonne conception et d'un site très favorable. Ainsi, le taux de confort dans les salles est au-dessus de 70% et les températures mesurées restent faibles. A contrario, par exemple, l'environnement du lycée de Mamoudzou Nord est très dense et ne favorise pas la ventilation naturelle. Le taux de confort est donc inférieur à 50% dans certaines salles et les températures intérieures dépassent très souvent les 30°C.

Concernant le collège de Bouéni, qui avait reçu le prix d'excellence du « bâtiment résilient », aux vues des résultats, ne semble pas répondre aux attentes. En effet, les résultats obtenus pour cet établissement sont les plus faibles de l'étude. Les deux bureaux d'étude expliquent ces différences par le manque d'inertie des matériaux utilisés dans sa construction. A l'inverse des quatre autres bâtiments étudiés qui sont construits entièrement en béton, les maîtres d'œuvre en charge de la conception de ce bâtiment ont voulu abaisser au maximum l'inertie du bâtiment de Bouéni comme le préconisait les différents référentiels sur la conception Bioclimatique en région tropicale.

Néanmoins, ces résultats sont à prendre avec du recul. Il n'y a pas eu de mesure de la vitesse de l'air dans les salles (ils ont fait l'hypothèse que l'air circulait à une vitesse de 1m/s) et dans le calcul du confort intérieur ils n'ont pas pris en compte ce paramètre. Cependant, la conception du collège de Bouéni repose sur la ventilation naturelle et le rafraîchissement passif. En effet, ce collège est particulièrement bien situé pour récupérer le vent et la porosité des façades est bien supérieure à tous les autres établissements scolaires de Mayotte. Les capteurs mesurent donc des températures très hautes mais la température ressentie doit sûrement être bien plus faible. De plus, aucun retour négatif de la part de l'équipe pédagogique du collège n'a été remonté au Rectorat. De la même façon, les résultats des autres établissements sont à remettre dans leur contexte, les taux de confort ne sont peut-être pas si élevés si la vitesse d'air de 1m/s dans les salles de classe n'est pas atteinte.

## Conclusions à retenir et questions soulevées sur l'inertie

Ce premier retour d'expérience sur des établissements scolaires remet en cause une partie de la stratégie environnementale du Rectorat de Mayotte. Contrairement à ce qui se faisait jusque-là, l'inertie dans les établissements scolaires doit être maximal afin de garantir de la fraîcheur en journée. J'ai pu comprendre par la suite, que les acteurs qui entourent le Rectorat de Mayotte dans la réalisation de ses projets scolaires se basent sur des référentiels qui ne sont pas toujours adaptés à leurs besoins.

Implicitement, les guides de conception durable en région tropicale, auquel ils font références, orientent leurs conseils pour des opérations de logement et non de tertiaire sans annoncer cette distinction alors qu'une distinction doit être faite entre les habitations et le tertiaire : les logements sont occupés nuit et jours, et les écoles, par exemple, seulement en journée (7h-18h).

Pour comprendre le problème, il faut revenir à la définition de l'inertie des parois. Selon *Le Robert*, celle-ci est la « capacité d'un matériau à accumuler puis à restituer un flux thermique ». Elle est caractérisée par le temps que va mettre le matériau à restituer la chaleur et la fraîcheur accumulés. Plus son inertie est grande, plus le matériau mettra du temps à restituer l'énergie accumulée. A Mayotte, le taux d'ensoleillement est très important et les chaleurs sont élevées en journée, les matériaux à fortes inerties vont donc emmagasiner de la chaleur tout au long de la journée et la restituer en fin de journée. Dans un logement on veut éviter ce cas pour ne pas avoir chaud la nuit et optimiser le confort le soir en ouvrant les façades afin de profiter de la fraîcheur extérieur. En analysant le diagramme de Givoni pour des habitations où l'on suppose que l'occupation est surtout le soir, on obtient un meilleur confort global avec une structure à faible inertie. Cependant, dans des établissements scolaires occupés entre 7h et 18h, il est intéressant d'avoir un pic de chaleur décalé en fin de journée. Cela explique pourquoi le taux de confort du collège de Bouéni obtenu est si faible comparé aux bâtiments en béton. La période où il fait le plus chaud tombe en plein dans les horaires d'occupation scolaire. Dans les autres établissements la fraîcheur emmagasinée pendant la nuit se ressent longtemps dans la journée et leurs permet d'avoir un taux de confort très bon en journée.

Néanmoins, il faut garder l'ouverture des façades sur l'extérieur et ne pas isoler les bâtiments. En effet, les élèves dans les salles de classes peuvent dégager beaucoup de chaleur, ce qui est d'autant plus vrai à Mayotte où les écoles sont saturées. Ainsi, la porosité des façades et la ventilation naturelle en journée va permettre d'évacuer les surchauffes.

Par conséquent, la leçon à tirer de ce retour d'expérience est qu'il faut plutôt augmenter au maximum l'inertie des établissements scolaires, sauf pour le cas particulier des internats ou des établissements accueillants des cours du soir.

### Un équilibre à trouver pour concilier confort dans les pièces et respect de l'environnement

On parlait dans la partie 3.1.2 de l'équilibre à trouver entre les protections solaires et la porosité des façades pour atteindre le confort dans un bâtiment. A cela, on peut ajouter la notion d'inertie afin d'aider le bâtiment à rafraîchir l'air intérieur. Le béton a été beaucoup utilisé car il correspond à cette recherche d'inertie et répond aux normes sismiques, mais ce matériau va à l'encontre du respect de l'environnement.

Un juste équilibre entre le choix des matériaux pour abaisser le bilan carbone, assurer la sécurité du bâti vis-à-vis des risques environnementaux et la recherche de confort

intérieur devient une contrainte supplémentaire à prendre en compte en phase de conception.

Malgré le développement de la filière BTC, un matériau rassemblant les critères d'inertie et de bilan carbone, ses caractéristiques structurelles trop faibles ne permettent pas de remplacer entièrement le béton dans les constructions mahoraises. En couplant cette brique avec le bois, en remplissage ou par exemple dans les cloisons, on peut ainsi assurer l'inertie du bâtiment et la solidité de la structure.

### **3.4 Difficile équilibre entre modernité et traditions**

#### **3.4.1 Constructions inspirées des normes occidentales**

L'influence de la France et de la mondialisation a modifié complètement les méthodes de construction et le choix des matériaux. La BTC et les autres matériaux traditionnels ont été délaissés pour les parpaings et le béton armé considérés comme plus solides. En effet, selon le retour d'expérience de MayEnergie en 2020, la moitié des locataires d'immeuble en béton ne seraient pas prêts à habiter dans un logement construit en BTC.

Par ailleurs, on constate sur ce même retour d'expérience qu'il y a globalement une mauvaise conception des bâtiments et un manque de prise en compte de l'ensoleillement et du climat. Ce rapport soulève plusieurs problèmes qui provoquent des surchauffes dans les bâtiments et abaissent le confort intérieur :

- 40% des opérations visitées ne sont pas traversantes
- 4 opérations sur les 10 étudiées sont orientées Ouest et Est. Cette configuration est la plus défavorable, elle maximise l'ensoleillement direct sur les façades.
- La porosité des façades est souvent trop faible
- On constate la présence de volets non adaptés à la ventilation naturelle : leurs lames ne permettent pas de laisser passer l'air.
- Les protections solaires sont parfois de couleurs sombres ce qui réchauffe l'air entrant dans les pièces. De plus, les débords de toiture sont insuffisants voir parfois complètement absents : les façades sont ainsi directement impactées par le rayonnement direct du soleil (photo 1 de la Figure 34).
- Les toitures ne sont que très rarement isolées. Certains bâtiments ont une uniquement une couverture en tôle non isolée ni ventilée (photo 2 de la Figure 34)
- La végétalisation devant les façades est rare, seulement 2 opérations sur les 10 présentes une végétation autour des bâtiments. De plus, seulement une de ces deux opérations semble avoir une végétation variée (photo 3 de la Figure 34).



Figure 34 - Photos d'opérations de la SIM avec des conceptions peu adaptées au climat mahorais

1 : absence de débord de toiture, 2 : toiture tôle non isolée, 3 : abord du bâtiment en béton sans végétation

En outre, la place de la voiture est très présente dans les constructions mahoraises. Les services de transport en commun sont très peu développés sur le territoire ce qui crée une dépendance des habitants à leurs propres véhicules. Par conséquent, des places de parking sont systématiquement aménagées à proximité des habitations ce qui cause une imperméabilisation des sols et un étalement urbain.

### 3.4.2 Des habitudes en incohérence avec la conception bioclimatique

#### La recherche de confort en passant par l'installation de climatiseurs

Les changements de l'architecture mahoraise s'est suivi d'un changement de comportement de ses habitants. L'arrivée de la climatisation leurs a permis de vivre dans des pièces plus fraîches et de ne plus souffrir des chaleurs de l'île. Malgré une forte consommation en énergie des climatiseurs, d'après le retour d'expérience de MayEnergie, dans 60% des foyers équipés de climatiseurs, les habitants estiment que le confort prime sur le prix. Sur les 40% restant, seulement 10% réduisent leurs consommations par souci de la protection de l'environnement. Dans ces logements, en été, la quasi-totalité des habitants allument systématiquement leurs climatiseurs la nuit



plutôt que d'ouvrir les fenêtres et décharger les murs des surchauffes naturellement. De surcroît, l'isolation des bâtiments n'est pas adaptée aux systèmes de climatisation, il y a beaucoup de déperdition.

Dans les établissements scolaires, pour des raisons économiques, les salles de classes n'ont jamais été équipées de système de climatisation malgré les nombreuses plaintes des parents d'élève qui sont en désaccord avec cette pratique. En effet, il leur semble injuste que les établissements métropolitains soient tous équipés de système de chauffage et que le rectorat ne raisonne pas de la même façon à Mayotte.

### La recherche d'intimité et l'insécurité à Mayotte

Ces deux notions poussent les résidents à protéger leurs logements. Dans des bâtiments où la conception bioclimatique n'est déjà pas très bien maîtrisée et où il est fréquent d'avoir de grosses surchauffes, ce renfermement bloque toutes les tentatives de rafraîchissement passif. En effet, les habitants installent par exemple des rideaux devant les ouvrants pour se protéger des vis-à-vis. De surcroît, ces dispositifs informels leur permettent de palier au mauvais dimensionnement des protections solaires et leur permettent de se protéger de l'ensoleillement. La ventilation naturelle ne peut alors plus se faire et en bloquant l'ensoleillement, ils sont obligés d'utiliser un éclairage artificiel.

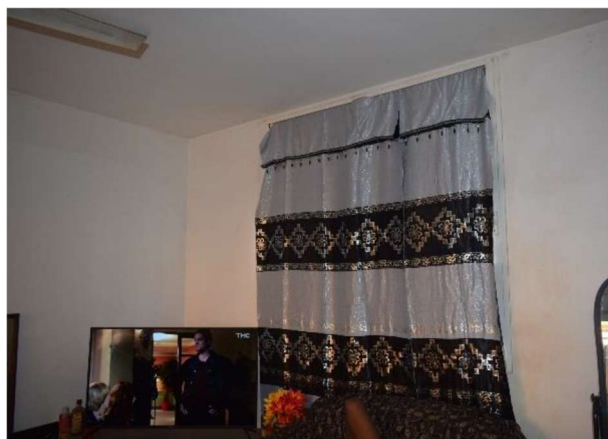


Figure 35 - Opération de la SIM, Doujani, fenêtre bouchée à l'aide d'un rideau

Du côté des établissements scolaires, on peut retrouver des usages similaires à ceux des logements. Les professeurs ferment les fenêtres et les rideaux pour limiter les nuisances sonores et visuelles qui déconcentrent leurs élèves. Dans des classes suroccupées on imagine bien que cette pratique va créer des surchauffes et un fort niveau d'inconfort.



### 3.4.3 Agir pour améliorer les conceptions mahoraise et prendre en compte l'usage actuel

#### Prévoir la vie du bâtiment dans la conception

Les différents retours d'expérience de l'ADEME ont pu mettre en lumière différents problèmes dû à l'utilisation de la ventilation naturelle dans des logements. Il serait envisageable de transposer cette étude sur des établissements scolaires et anticiper pendant la phase de conception les nuisances que pourraient provoquer la conception durable et les moyens que le corps enseignant pourrait mettre en place pour les contrer (installation de rideau, fermeture constante des ouvrants, non-utilisation des brasseurs d'air, ...).

De plus, la délinquance étant très présente à Mayotte et dans les écoles mahoraises, l'enjeu est de construire des établissements où les élèves se sentiront en sécurité. La COP et les équipes de programmation devront avoir un regard vigilant sur l'aménagement des bâtiments pour éviter les lieux isolés, les équipements pouvant être escaladés et les possibilités d'intrusion. En effet, le besoin d'augmenter la porosité des façades demande d'avoir de nombreux ouvrants et d'ouvrir les locaux sur l'extérieur. Cela peut créer des grandes portes d'entrée pour des personnes malintentionnées.

#### Agir pour sensibiliser les habitants à la conduite du changement et la conception Bioclimatique

Il y a un manque de sensibilisation des mahorais sur la conception Bioclimatique et les qualités de la BTC. Ces derniers n'utilisent pas correctement leurs systèmes de refroidissement par manque de compréhension. Ils vont préférer baisser la température de commande de leur climatiseur plutôt que de combiner celui-ci avec leurs brasseurs d'air.

Pour contrebalancer cette tendance, le rectorat aimerait que le futur AMO environnement réalise des campagnes de sensibilisation auprès des usagers. Cela passera par la rédaction de documents avec des recommandations d'utilisation des équipements à destination des maîtres d'ouvrage, des utilisateurs du bâtiment et des gestionnaires. Il leur expliquera le rafraîchissement passif, les enjeux pour l'environnement et leur implication dans la conduite du changement.

En parallèle des campagnes de sensibilisation dans les écoles ont déjà vu le jour à Mayotte avec l'aide d'équipes d'architectes. En effet, sur certaines opérations dont celle de Tsimkoura, les maîtres d'œuvre ont proposé d'avoir une personne présente constamment sur le lieu de l'opération. Cette personne agit directement dans les salles de classe pour expliquer le projet aux élèves et aux équipes encadrantes afin de les sensibiliser à l'urgence climatique et les impliquer dans un projet durable. La photo sur la Figure 36 montre un de ces ateliers de sensibilisation.



**Figure 36 - Atelier réalisé au collège de Tsimkoura sur l'impact de l'homme sur son environnement avec comme cas d'étude le projet de restructuration du collège**

Cette présence dans les écoles pourrait faire l'objet dans le future d'une demande du rectorat et non d'une proposition de la MOE. De plus, ce type d'exercice ne devrait pas se restreindre aux établissements concernés par une réhabilitation, des cours sur le dérèglement climatique et les possibilités pour agir pour la protection de l'environnement à Mayotte pourraient être réalisés dans l'ensemble des écoles mahoraises.

# Conclusion

---

Pour répondre à la croissance démographique et respecter l'égalité des chances des jeunes élèves français dans le département le plus pauvre de France, le gouvernement français a mis en place un plan de relance très ambitieux. Ainsi, le Rectorat de Mayotte, en charge de la construction, la maintenance et l'exploitation des collèges et des lycées mahorais, lance de multitudes d'opérations de construction ou de réhabilitation d'établissements scolaires sur tous l'archipel.

En parallèle, le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) rédige des rapports préoccupants sur l'impact de l'homme sur le dérèglement climatique. Leur sixième et dernier rapport du 9 août 2021 ne fait pas que l'œuvre de constats mais aussi et surtout d'un appel à l'action. Cette crise mondiale a été largement comprise par le Rectorat de Mayotte qui soutient la construction durable et tente de réaliser des bâtiments frugaux en matériaux, en énergie et en technique. Sur un territoire où le climat et les aléas météorologiques de l'archipel rendent la recherche du confort très complexe, leur difficulté réside dans l'équilibre entre le confort et la frugalité. A l'aide d'acteurs engagés dans la conduite du changement et en s'inspirant de l'architecture traditionnelle mahoraise, le Rectorat a développé au fur et à mesure une stratégie environnementale basée sur le refroidissement passif des bâtiments, le développement de l'économie locale et le respect de l'environnement. Leur démarche et leurs ambitions très ambitieuses font du Rectorat de Mayotte un exemple à suivre par les maîtres d'ouvrage mahorais.

Setec organisation, qui accompagne le Rectorat de Mayotte dans la réalisation de ses projets, se doit de les conseiller et d'avoir un regard averti sur le déroulé des opérations. Leur objectif en tant qu'AMO et conducteur d'opération est le respect du triptyque : coût, qualité, délais. Le présent rapport destiné aux équipes de conduite d'opération accompagnant le Rectorat de Mayotte, présente plusieurs nuances dans la conception/construction/exploitation que j'ai pu mettre en évidence au travers de mes recherches et des différents entretiens que j'ai pu mener. Ces problématiques concernent des sujets très divers : la maîtrise de la conception bioclimatique (un équilibre à trouver entre confort olfactif, visuelle, acoustique, et hygrothermique), le choix du terrain, la recherche de données initiales fiables, etc.

Ce rapport n'a pas pour but d'être exhaustif sur le sujet et le territoire de Mayotte offre bien d'autres problématiques non évoquées. De plus, la conception Bioclimatique reste une science très jeune et particulièrement à Mayotte dont les problématiques varient pour chacune des opérations. Le manque de retour d'expérience laisse trainer encore de gros doutes sur le futur de la conception durable à Mayotte et c'est un volet qu'il sera nécessaire de développer en priorité pour pérenniser ce type de conception et améliorer le confort des mahorais.

# Bibliographie

---

Ademe, DEAL, Imageen, Esiroi, *MayEnergie plus*, 2013

Ademe, Imageen, *REX Mayenergie et Mayenergie plus*, février 2020

Institution de la francophonie pour le développement durable, *Guide du bâtiment durable en régions tropicales*, 2015

Rectorat de Mayotte, *Référentiel des collèges et des lycées à Mayotte*, version provisoire, 2021

Menighetti, In'terra, *Elaboration du référentiel des collèges et des lycées à Mayotte, Bilan de l'instrumentation sur une année scolaire*, juillet 2021

Conseil régional de la Réunion, Université de la Réunion, Imageen, *PERformances ENergétiques des bâtiments à La Réunion*, 2009

Tribu, ICEB, *Guide du confort d'été passif*, 2014

INSEE, *L'essentiel sur ... Mayotte*, 2021

INSEE, *Mayotte, 10 ans après la départementalisation*, 2021

Département d'architecture, Université Mohamed Khider, *Stratégies pour un environnement construit durable*, 2014

Certivea, Afnor, *Référentiel pour la qualité environnementale des bâtiments, addendum applicable aux DOM-COM*, 2017

Harappa, *Références*, 2018

# Annexes

## Annexe 1 : Carte topographique de Mayotte



Source : Wikipédia

## Annexe 2 : Tableau comparatif des climats de Mayotte et de Marseille

	Température moyenne Mayotte (°C)	Température moyenne Marseille (°C)	Quantité de précipitation mensuel à Mayotte (mm)	Quantité de précipitation mensuel à Marseille (mm)	Heures d'ensoleillement total par mois à Mayotte	Heures d'ensoleillement total par mois à Marseille	Humidité relative à Mayotte (%)	Humidité relative à Marseille (%)
Janvier	27,7	7,1	270	48	185	145	80	75
Février	27,8	8,1	230	31	170	173	78	70
Mars	28,2	11	207	30	215	238	78	70
Avril	28,8	13,8	101	54	240	245	75	65
Mai	27,1	18	31	41	280	295	70	60
Juin	25,8	21,8	20	25	240	335	69	62
Juillet	24,7	24,8	10	9	280	370	68	53
Août	24,3	24,4	12	31	280	325	68	53
Septembre	24,9	20,6	20	65	270	260	69	60
Octobre	26,1	16,6	58	67	250	185	70	63
Novembre	27,2	11,1	83	56	240	150	72	72
Décembre	27,7	7,9	183	46	215	135	75	72
Annuel	26,6	15,5	1226	515	2865	2860	72	64

Source : infoclimat.fr