



MINISTÈRE DES OUTRE-MER

Rapport final du programme COBIOPOL

Pascal ORTEGA, Franck LUCAS, Marania HOPUARE

Octobre 2013 - Avril 2016

Table des matières

Table des matières	2
Avant Propos	4
Partie 1 : Climat et données météorologiques	6
1. INTRODUCTION	6
2. LES FICHIERS METEOROLOGIQUES ANNUELS TYPES	8
2.1. Les différents formats « d'années météorologiques types »	9
2.2. Les variables des fichiers météorologiques annuels types	9
2.2.1. Rayonnement solaire	10
2.2.2. Le vent	10
3. CREATION DU FICHIER METEOROLOGIQUE ANNUEL TYPE POUR LA POLYNESIE	10
3.1. Données climatiques issues des observations	10
3.2. Méthodologie de construction du fichier météorologique annuel type	11
3.3. Modèle de décomposition du rayonnement solaire	12
3.4. Génération du fichier .epw	14
4. DONNEES METEO EXTRAPOLEES PAR UN MODELE DE MESO-ECHELLE	15
4.1. Méthodologie	16
4.2. Identification des régimes de vents dominants à Tahiti	17
4.3. Descente d'échelle	18
4.4. Validations	19
4.4.1. Confrontation avec les données de la station Météo France de Faaa 19	
4.4.2. Confrontation avec les stations mobiles installées et les parcs mobiles	21
PARTIE 2 : CONCEPTION BIOCLIMATIQUE	22
5. INTRODUCTION	22
5.1. Principes et objectifs de l'étude	22
5.2. Les typologies de bâtiments	22
5.3. Les sollicitations climatiques des bâtiments en PF	22
5.4. Les Outils expérimentaux	23
5.4.1. Mesure des conditions météorologiques	23
5.4.2. Mesure des conditions d'ambiance intérieures	24
5.5. Outils numériques	25
6. ETUDE DU FAREMTR	26
6.1. Description de la typologie habitation	26
6.1.1. Composition de la structure et des murs	26
6.1.2. Les menuiseries	26
6.1.3. La toiture et faux plafond	27
6.2. Analyse des résultats expérimentaux	27
6.3. Etude numérique	30
6.4. Prescriptions d'amélioration	30

6.4.1. Isolation de la toiture	30
6.4.2. Protection solaire des parois verticales (baies et murs)	32
6.4.3. Ventilation du bâtiment	35
6.5. Synthèses des prescriptions	36
7. ETUDE DE LA TYPOLOGIE « ECOLE »	38
7.1. Description des types de bâtiment	38
7.1.1. Exemple d'école de conception ancienne : Ecole de Papetoai	38
7.1.2. Exemple d'école de conception récente : école de Te'avarao (Moorea)	39
7.2. Etude expérimentale de la typologie « Ecole »	39
7.2.1. Mise en évidence des problématiques des écoles de conception ancienne	40
7.2.2. Mise en évidence des problématiques des écoles de conception récentes	43
Confort hygrothermique	43
Apports thermiques	44
Usages du bâtiment	46
7.3. Etudes par simulation numérique des bâtiments	47
7.3.1. Modélisation des bâtiments	47
Ecole de conception ancienne	47
Ecole de conception récente	48
7.3.2. Présentation des résultats de simulation pour les écoles anciennes	49
Potentiel d'amélioration des conditions des confort dans les écoles anciennes	49
Synthèse des prescriptions pour les écoles de conception ancienne	52
7.3.3. Présentation des résultats de simulation pour les écoles de conception récente	54
Evaluation du coefficient de réduction des protections solaires	54
Facteur solaire équivalent	56
Traitement des baies orientées à l'OUEST	57
7.4. Problématique de la climatisation des salles de classe en Polynésie	58
7.5. Synthèse de l'étude de la typologie école	59
8. ETUDES DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION « LOCAUX »	59
8.1. Les matériaux locaux utilisés dans la construction	60
8.2. Méthodologie d'étude	61
8.3. Premiers résultats expérimentaux.	61
8.4. Synthèse et perspective pour l'étude des matériaux locaux de construction	62
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	63
ANNEXE : Problématique de l'isolation des toitures par PMR en Polynésie	65
RÉFÉRENCES	68
Liste des Figures	70
Liste des Tableaux	72

Avant Propos

Ce présent rapport propose la synthèse des travaux menés dans le cadre du projet COBIOPOL élaboré par l'UPF sur financement conjoint Ministère de l'Outre Mer, ADEME Polynésie française, CQSM et UPF

Ce projet est porté scientifiquement par le Laboratoire GEPASUD de l'Université de la Polynésie française en partenariat avec le laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion.

En préalable à la mise en place d'une réglementation énergétique des bâtiments, l'ADEME et le Pays ont mis en place des ateliers de réflexion avec l'ensemble des acteurs locaux de la construction et des formations à l'éco-construction destinés aux maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre. A l'issue de ces ateliers, il est apparu nécessaire de développer des méthodes et outils adaptés ainsi que des projets de bâtiments exemplaires servant de références.

La Réunion et les autres DOM ont suivi une démarche similaire avec la mise en place de l'opération expérimentale ECODOM en 1997, qui a, par la suite, donné lieu au référentiel PERENE en 2004, puis à la réglementation RTAADOM applicable depuis 2010. Le référentiel PERENE a été modifié en 2009 pour le rendre plus pédagogique, mieux adapté et plus exigeant sur certains points. Cette démarche évolutive a été accompagnée par des activités de recherche expérimentales et numériques menées notamment par l'Université de La Réunion.

Plus proche de la Polynésie française, en Nouvelle Calédonie, un référentiel de construction (ECCAL) a été établi et suivi d'une réglementation thermique (FENC).

L'ensemble de ces démarches ont conduit à une sensible amélioration des habitudes constructives dans l'ensemble des DOM et certains autres territoires ultra-marins français.

La Polynésie française a récemment entamé une démarche d'élaboration d'une réglementation énergétique des bâtiments. Dans ce contexte, le projet COBIOPOL a été élaboré avec trois types d'objectifs :

- Objectifs scientifiques :
 - Développer une expertise locale concernant la conception bioclimatique des bâtiments et la MDE adaptée au contexte Polynésien.
- Objectifs « industriels » :
 - Transfert d'expertise vers les secteurs industriels afin d'améliorer les pratiques industrielles et la qualité des produits industriels locaux.
 - Identification et qualification de référence démonstratives pour les acteurs industriels et publics.
 - Soutien au développement de filières locales de production de matériaux de construction
- Objectifs environnementaux :
 - Contribuer à réduire la consommation et l'appel de puissance électrique des bâtiments Polynésiens en réduisant la puissance et la consommation des systèmes de climatisation.
 - Contribuer à améliorer les conditions de confort dans les bâtiments non climatisés par une conception thermique adaptée permettant de limiter le recours à la climatisation

Ce rapport présente les résultats de l'ensemble des travaux effectués dans le cadre de ce projet en mettant plus particulièrement l'accent sur les résultats scientifiques.

Ainsi, la première partie du rapport est consacrée à l'analyse des données climatiques et à la méthode d'élaboration d'un fichier climatique type.

La deuxième partie du rapport présentera les résultats liés aux études expérimentales et de simulation numérique menées sur deux types de bâtiment à Tahiti et Moorea. Cette partie se termine par la présentation des premiers essais de qualification de matériaux locaux de construction.

L'UPF, par la volonté de son président, s'est engagée dans une conversion thématique afin d'accompagner, d'une part, les projets de mise en place d'une réglementation thermique des bâtiments et, d'autre part, la transition énergétique engagée par le gouvernement de la Polynésie française. Le laboratoire GEPASUD de l'UPF s'est fortement appuyé sur l'expertise et le savoir-faire du laboratoire Piment de La Réunion.

La collaboration des deux équipes a conduit à l'ouverture d'une Licence Professionnelle dédiée à la Maîtrise d'Énergie et à l'élaboration de ce programme COBIOPOL. Pour garantir le succès de cette conversion thématique, l'UPF a recruté en délégation, pour une durée de quatre ans, un enseignant-chercheur du laboratoire PIMENT, M. Franck Lucas, et a recruté, pour une durée de deux ans, un enseignant-chercheur contractuel, Mme Marania Hopuare, jeune docteur de l'UPF. Le financement de COBIOPOL a permis :

- de former Mme Hopuare à la manipulation des modèles numériques de climat à maille fine afin de répondre au premier objectif de ce programme (stage au CNRM de Météo France et à l'École Polytechnique de Paris) (≈ 3000)
- d'acquérir du matériel scientifique de qualité afin de mener au mieux les campagnes de mesures indispensables à la réalisation de l'objectif 2 ($\approx 20\ 000$)
- d'établir une collaboration durable avec le laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion ($\approx 10\ 000$)
- de financer un stage de Master 2 (Master 2 Énergie Solaire de l'Université de Perpignan) afin de compléter les études numériques de simulation du comportement thermique de deux bâtiments ($3\ 500$)

Notons également, que ce programme a fait l'objet de trois projets tuteurés de la Licence Professionnelle « Énergies Renouvelables et Maîtrise d'Énergie) ouverte en 2013 à l'UPF.

Nous insistons sur le fait que ce précieux transfert de compétences issues du laboratoire PIMENT, du CNRM et de l'École Polytechnique n'a pu se réaliser que grâce au financement de ce programme. Cette conversion thématique de notre laboratoire est maintenant bien enclenchée et depuis, toujours grâce à ce programme, nous avons obtenu le financement d'un contrat doctoral (Service de l'Énergie – Ademe Polynésie et École Doctorale du Pacifique).

Signalons enfin, que ces travaux ont déjà conduit à la rédaction d'une publication [Lucas et al, 2015] et deux présentations en conférences internationales qui feront l'objet de publications [Hopuare et al 2016a, 2016b].

Pour toutes ces raisons, nous, auteurs de ce rapport, remercions le ministère de l'Outre-Mer, M. Le Délégué Régional à la Recherche et la Technologie, M. Eric Qua, la délégation de l'ADEME en Polynésie, la CQSM, pour leur soutien financier et pour la confiance qu'ils nous ont accordée pour la réalisation de ce programme.

Partie 1 : Climat et données météorologiques

1. INTRODUCTION

Les paramètres climatiques constituent la sollicitation principale des bâtiments. Ils ont un impact direct sur la consommation des bâtiments climatisés et/ou sur les conditions de confort pour les bâtiments ventilés naturellement. Certains paramètres ont aussi une importance fondamentale pour la qualification des ressources en énergies renouvelables (solaire et éolienne). Or, il apparaît qu'il existe peu de données climatiques permettant l'étude de la conception de bâtiments et l'estimation du potentiel d'énergies renouvelables en Polynésie française. Il convenait donc de travailler en premier lieu à la création d'un fichier contenant ces informations avec une bonne résolution à la fois temporelle et géographique et accessible à l'ensemble des professionnels concernées par le bâtiment.

Le **rayonnement solaire** génère des sollicitations thermiques intenses, sources de surconsommation pour les systèmes de climatisation ou d'inconfort pour les bâtiments non climatisés. Ce rayonnement comporte en fait deux composantes agissant de façon différentes sur les bâtiments : une composante « directe » émise directement par le disque solaire et ayant une courte longueur d'onde ($<2,5 \mu\text{m}$) et en une composante « diffuse » réfléchiée par les nuages avec une longueur d'onde plus grande.

Les **données de vents** sont essentielles pour concevoir des bâtiments sans système de climatisation. En effet, dans ce cas, le confort repose principalement sur la valeur des débits aérauliques entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment et la vitesse de circulation de l'air dans les bâtiments. Les débits aérauliques permettent d'évacuer les charges internes et externes des bâtiments et limitent ainsi le phénomène de surchauffe. L'écoulement de l'air généré sur les occupants des bâtiments permet d'assurer une sensation de confort même avec des températures intérieures élevées ($>26^\circ\text{C}$). On estime qu'une vitesse d'air de 1m/s procure une sensation de confort équivalente à la température d'air moins 4°C . Ces deux variables (débit aéraulique et vitesse d'air) dépendent en premier lieu des conditions de vent à l'extérieur du bâtiment mais aussi de la conception de ce dernier. Les facteurs influents relevant de la conception du bâtiment sont très nombreux : dimensions des ouvertures, géométrie des ouvertures, disposition du bâtiment sur le site, orientation du bâtiment, agencement intérieur...

La conception de bâtiments à très faible consommation ou autonomes en énergie requiert donc des outils d'analyse et de prévision sophistiqués. Les codes de simulations thermiques dynamiques (STD) sont maintenant les outils les plus couramment utilisés pour estimer la performance d'un bâtiment lors de sa phase de conception. Cependant, ces prévisions sont parfois entachées d'erreurs. Les codes de STD permettent de simuler le comportement des bâtiments à partir de leur description physique et de données météorologiques (**Figure 1**). Les méthodes de conception ont évoluées ces dernières années. Analysé en régime permanent, on étudie maintenant le bâtiment en régime dynamique. Dans le premier cas, il s'agissait d'une analyse du bâtiment basée sur des conditions extérieures constantes : méthode des « conditions extérieures de bases » ou méthodes des « degrés-jours ». Aujourd'hui, la puissance de calcul des ordinateurs permet de développer des méthodes « dynamiques » prenant en compte la variation des conditions extérieures et intérieures d'un bâtiment. Ces nouvelles méthodes sont bien sûr plus précises et permettent d'estimer plus justement le dimensionnement des systèmes de conditionnement d'air en évitant un surdimensionnement trop important. Néanmoins, il existe des écarts non négligeables entre les performances énergétiques des bâtiments prédites en phase étude et les valeurs constatées en phase exploitation. La thèse de C Spitz [[Spitz 2012](#)] évalue l'ensemble des sources d'incertitude entre la phase conception et exploitation. Lenoir [[Lenoir 2010](#)] constate un écart de 47% entre la prédiction et la mesure de la consommation de la tour Eithis située à Dijon. Une partie de ces écarts vient de

l'exploitation du bâtiment par l'utilisateur. La phase « conception » génère des erreurs à cause des hypothèses de description du bâtiment et de ses composants. Spitz fait clairement remarquer que la qualité des données météorologiques utilisées lors des simulations numériques est une source d'erreur importante provoquant des écarts allant jusqu'à 30% sur l'estimation de la consommation d'un système de traitement d'air.

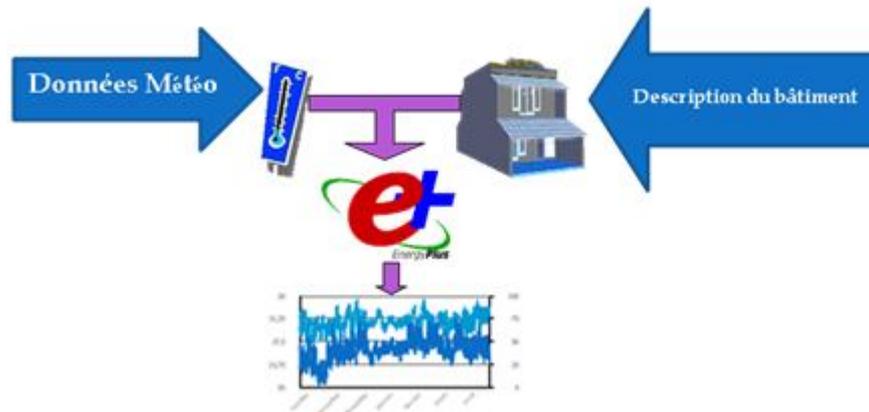


Figure 1 : Données d'entrée pour les simulations thermiques dynamiques des bâtiments

Les données météorologiques utilisées habituellement pour la conception thermique des bâtiments par les bureaux d'études répondent à des standards particuliers afin d'être représentatifs des sollicitations moyennes subies par les bâtiments. Plusieurs types de données peuvent être utilisés :

- les bases de données de plusieurs années: elles rassemblent toutes les données météorologiques nécessaires à la simulation des bâtiments et ce sur plusieurs années. Elles sont compliquées à utiliser du fait du grand nombre de valeurs qu'elles comportent. Exemple : base de données SAMSON de 1961 à 1990 [NCDC1993].
- les fichiers annuels météorologiques types: les plus couramment utilisés pour estimer les performances moyennes d'un bâtiment. Exemple : TMY, WYEC, TRY...
- les séquences météorologiques courtes représentatives: Elles sont utilisées pour étudier soit :
 - des conditions météorologiques extrêmes (très chaudes, très ensoleillées, très humides...),
 - des conditions météorologiques localisées tenant compte notamment des interactions relief/météorologie.

Des solutions techniques de conception particulières: étude du potentiel de ventilation naturelle pour un bâtiment.

Le dimensionnement de composants des bâtiments: séquences journalières pour dimensionner les systèmes de conditionnement d'air (appelées « design day »).

Le projet COBIOPOL a permis de développer des bases de données météorologiques correspondant aux points 2 et 3. Deux axes d'étude ont ainsi découlé de ce bilan préliminaire des contraintes environnementales sur les bâtiments à Tahiti.

Un premier travail a été mené afin d'établir un fichier annuel de sollicitations répondant au formalisme des fichiers annuels météorologiques types. Pour cela, les mesures au sol, opérées par Météo France, ont nécessité un traitement particulier afin d'obtenir la décomposition du rayonnement solaire global en rayonnements direct et diffus. Ce travail de décomposition est présenté dans ce rapport (paragraphe 3.3)

Le deuxième axe d'étude a traité la contrainte de la ventilation naturelle à Tahiti. Nous avons réalisé une descente d'échelle à 1,3 km de résolution des régimes de vents. La formation en métropole d'un membre de l'équipe sur deux modèles climatiques de méso échelle (au Centre

National de Recherches Météorologiques à Toulouse et à l'École Polytechnique à Paris) a été financée par le programme COBIOPOL. Les résultats de ces travaux sont restitués au paragraphe 4.

2. LES FICHIERS MÉTÉOROLOGIQUES ANNUELS TYPES

Dans la logique du projet COBIOPOL, les séquences qui paraissent les plus importantes et le plus urgent à constituer sont les fichiers annuels météorologiques types. Ce sont les séquences qui sont aussi le plus souvent utilisées par les concepteurs de bâtiments. Elles rassemblent toutes les variables climatiques importantes pour la simulation dynamique des bâtiments au pas de temps horaire et pour une durée d'un an. Il existe plusieurs possibilités pour obtenir ce type de séquence :

La première méthode dites des « années météorologiques types », est basée sur des mesures réelles faites au sol sur des périodes de collecte longues (15 à 30 ans). Elle reconstitue une année fictive en sélectionnant les différents mois de données les plus représentatifs sur la période de collecte. Ainsi le fichier est constitué, par exemple, du mois de janvier de l'année 2006, puis du mois de février de l'année 2001, puis du mois de mars de l'année 2003, etc.

La deuxième a été développée plus tard. Elle est basée sur l'utilisation de modèles stochastiques qui génèrent des séries temporelles de données climatiques par extrapolation de données mesurées par des stations au sol. Ces outils sont souvent appelés des « générateurs de climats ». Ces algorithmes reconstituent des fichiers climatiques horaires à partir de données mensuelles interpolées par des modèles stochastiques. Différents prestataires privés offrent cette solution. Parmi eux, par exemple, Météonorm est très utilisé par les maîtres d'œuvre.

Ces deux approches offrent chacune leurs avantages et leurs inconvénients :

- Pour la méthode des années météorologiques types, la première qualité qu'on peut lui reconnaître est qu'elle reflète des conditions climatiques réelles du site étudié. Cependant, par le mode d'élaboration de ces fichiers, elle ne produit que des conditions climatiques moyennes et ne décrit pas des périodes climatiques extrêmes qui sont pourtant parfois importantes pour la conception des bâtiments fonctionnant en ventilation naturelle. Pour ces bâtiments, l'évaluation du confort en période extrême est un bon indicateur de performance puisque si le confort est satisfaisant pendant ces périodes, il le sera assurément pour des conditions climatiques moins extrêmes. Ces fichiers sont établis pour des localisations équipées de stations météorologiques et ne peuvent pas toujours être exploités, en dehors d'un périmètre réduit autour de la station.
- La validité des fichiers produits par les « générateurs de climat » dépend des données d'entrées et des modèles stochastiques utilisés. L'extrapolation spatiale des données est possible et permet de générer des valeurs pour des localisations qui ne sont pas équipées de stations météorologiques. Il peut être nécessaire dans ce cas de corriger les valeurs pour tenir compte du relief. Celui-ci peut en effet avoir une influence significative notamment sur les données d'ensoleillement et bien sûr de vent. Un des intérêts des générateurs de climats est qu'il est possible d'introduire des scénarii d'évolution du climat. On peut citer l'outil Météonorm.

L'incertitude dans l'estimation des données météorologiques par ces deux méthodes dépend fortement de la qualité des données d'entrée et des paramètres orographiques. Pour les régions disposant d'un grand nombre de stations météorologiques la constitution d'une année climatique type est la meilleure solution. Pour les régions très montagneuses les fichiers TMY ne sont pas représentatifs des conditions climatiques dès qu'on s'éloigne de la station météorologique. Remund [Remund 2009] estime l'incertitude des données générées par METEONORM entre 1 et 2°C, ce qui est comparable à celles des fichiers météorologiques annuels types.

2.1. Les différents formats « d'années météorologiques types »

La création de fichiers météorologiques pour la STD a commencé depuis 1976 et a été réalisée par plusieurs laboratoires, suivant différentes méthodes. Ces méthodes ont permis d'établir plusieurs types de fichiers en fonction des méthodes de sélections des données, des années de collecte et des variables climatiques présentées :

- TRY (Test Reference Year) : Un des premiers formats de données météo, développé en 1976. Ce format est à l'origine des autres formats ci-dessous.
- TMY (Typical Meteorological Year) développé à partir du format TRY en y ajoutant notamment des données d'ensoleillement global horizontal. Le format TMY élaboré à partir de données prises sur les périodes de 1945 à 1973 a évolué en TMY2. Cette nouvelle base de données tient compte de données météorologiques supplémentaires telles que le rayonnement solaire direct puis en format TMY3 basées sur des données climatiques plus récentes (de 1961 à 1990). Les données TMY3 prennent en considérations des années encore plus récentes allant jusqu'à 2005.
- WYEC, (Weather Year for Energy Calculation) développé par ASHRAE. Comme pour le format TMY, la version WYEC2 a été réalisée à partir du format WYEC en ajoutant des variables supplémentaires, notamment pour la caractérisation de l'éclairage naturel.
- CTZ (California thermal zones) dérivé des fichiers TMY et étendu à des localisations hors Californie.

L'étude réalisée aux Etats Unis par Drury [Drury 1998] analyse les prévisions de performances d'un bâtiment en fonction du type de fichier météorologique utilisé et les compare à des simulations faites à partir de données réelles collectées sur 30 ans. Il note que les données climatiques utilisées en simulation dynamique de bâtiments peuvent avoir une influence non négligeable sur les prévisions des performances énergétiques des bâtiments.

L'évolution du climat sur la période de constitution des bases de données peut impliquer des variations significatives de la consommation énergétique annuelle d'un bâtiment (de -7% à +11%). Des variations encore plus conséquentes sont observées sur les puissances thermiques annuelles maximales pour la climatisation (-11,5% à +30,5%) et sur la puissance annuelle maximale de chauffage (-48,5% à +3,2%).

Les prédictions des performances énergétiques sont aussi influencées par le fichier météorologique type utilisé. Des écarts de -2,3% à +5,4 % sont observés sur la consommation énergétique annuelle alors que ces écarts atteignent -11,6% à +22,6% pour la puissance thermique annuelle maximale pour la climatisation.

Drury conclut son étude en déconseillant l'utilisation du format TRY. Les formats TMY2 et WYEC2 donnent les résultats les plus proches des simulations faites à partir des 30 années de données réelles.

Les fichiers météorologiques types (TMY2 ou WYEC2) donnent des valeurs horaires des principales données météorologiques influençant le comportement des bâtiments: température, ensoleillement, humidité, vent... Il faut noter que ces fichiers sont aussi utilisés pour la conception de systèmes énergétiques solaires (Systèmes de production d'eau chaude solaire).

2.2. Les variables des fichiers météorologiques annuels types

Ces fichiers sont principalement constitués par les variables climatiques constituant une sollicitation pour les bâtiments. Nous ne présentons ci-après que le traitement de deux variables prépondérantes pour la conception des bâtiments en climat tropical fonctionnant en ventilation naturelle ou climatisés: le vent et le rayonnement solaire. L'humidité a également une importance

non négligeable, notamment pour le cas des bâtiments climatisés, mais cette variable n'a pas été traitée dans ce programme, puisque disponible dans les bases de données de Météo France.

2.2.1. Rayonnement solaire

Il est impératif de considérer ce rayonnement global suivant deux composantes agissant de façons différentes sur les bâtiments :

- la composante directe, émise directement par le disque solaire caractérisée par une courte longueur d'onde ($<2,5 \mu\text{m}$)
- la composante diffuse réfléchiée par l'environnement (les nuages, le sol, les bâtiments voisins..) de longueur d'onde plus grande.

Ces deux paramètres peuvent être mesurés, mais de plus en plus, la valeur de l'un est déduite de la mesure de l'autre. Dans ce programme, une attention particulière sera portée sur la relation entre ces deux composantes.

2.2.2. Le vent

Les données de vents sont essentielles pour concevoir des bâtiments sans système de climatisation. En effet, dans ce cas, le confort repose principalement sur les débits des transferts aérauliques entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment et la vitesse de l'air dans les bâtiments. Les débits aérauliques permettent d'évacuer les charges internes et externes des bâtiments et limitent ainsi le phénomène de surchauffe. La vitesse d'écoulement de l'air générée sur les occupants des bâtiments permet d'assurer une sensation de confort même avec des températures intérieures élevées ($>26^\circ\text{C}$).

3. CREATION DU FICHIER METEOROLOGIQUE ANNUEL TYPE POUR LA POLYNESE

Le fichier météo type est un fichier qui contient des données climatologiques horaires pour les 365 jours de l'année. Chaque donnée est une valeur moyenne représentative de l'heure du jour de l'année. Le fichier représente donc une année type météorologique, c'est à dire les conditions climatiques que l'on rencontre le plus souvent à Tahiti. Le format de ce type de fichier est standard car il est utilisé comme entrée dans les codes de simulations dynamiques du comportement des bâtiments. Ces fichiers comportent principalement les données suivantes :

- la température,
- l'humidité relative,
- la vitesse du vent,
- la direction du vent,
- l'irradiation directe,
- l'irradiation diffuse

Nous avons travaillé à la réalisation de ce fichier météo annuel type à partir d'observations, c'est-à-dire de données mesurées. Cette méthode est plus proche de la réalité puisqu'il s'agit de données mesurées. Mais elles ne renseignent uniquement que sur les conditions climatiques proches de la station de mesure.

3.1. Données climatiques issues des observations

Les données climatiques observées sont celles collectées par les stations de Météo France. Nous avons également fait des mesures à l'aide de stations météorologiques portables financées par ce programme. Malheureusement, les données obtenues auprès de Météo France ne concernent qu'un nombre très limité de sites. Par exemple sur Tahiti, seules les données horaires du site de l'aéroport de Faa'a sont disponibles. Il n'existe pas de séries temporelles exploitables pour la partie Est et Sud

de l'île de Tahiti. Les mesures par station météo portable concerne des périodes réduites et ne donnent pas toutes les variables météorologiques et un traitement de ces valeurs est nécessaire avant leur utilisation. Elles apportent cependant des informations très localisées.

3.2. Méthodologie de construction du fichier météorologique annuel type

Pour construire le fichier météorologique annuel type, l'idée la plus simple ou plus directe est de prendre une longue série temporelle (10 ans minimum) et, pour chaque heure des 365 jours de l'année, calculer les moyennes sur la série temporelle. Il faut alors acquérir un très grand nombre de données (24 heures x 365 jours x 10 ans ou plus, ceci multiplié par le nombre de paramètres) dont le coût est quasi rédhibitoire. Nous avons donc utilisé la méthode de Crow décrite dans *Quedraogo et al 2012*. On considère alors les moyennes mensuelles du paramètre sur une série temporelle d'au moins dix ans (par exemple). On calcule pour les douze mois de l'année, la moyenne de ce paramètre (sur dix ans, moyenne des dix mois de janvier et ainsi de suite). Puis on relève pour chaque mois l'année donnant la moyenne mensuelle la plus proche de cette moyenne climatologique. Une fois ces douze années identifiées on fait l'acquisition (achat) de tous les paramètres avec un pas horaire seulement pour ces années. Le paramètre utilisé pour la sélection des années "types" est la température. Dix années de température mensuelle (1997 à 2006) ont été traitées pour créer ce fichier. Par exemple, le mois de Janvier 2006 a été choisi pour le fichier TMY car il vérifie :

$$T(\text{jan}_{2006}) - T(\text{jan}_{10\text{ans}}) = \text{Minimum}$$

On procède ainsi pour les 12 mois de l'année et on obtient l'année météorologique annuelle type suivante :

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Année	2006	2002	2001	1998	1997	1998	1999	1998	2001	1998	2004	1999

Le fichier météorologique annuel type se présente ainsi, au format EXCEL (extrait):

Date	heure	T(°C)	FF10 (m/s)	DD 10m	Hum. Rel. (%)	Global (J cm ²)	Diffus (J cm ²)
01-janv	0	26,5	2	100	63	0	0
01-janv	1	26,7	3	90	66	0	0
01-janv	2	26,5	2	90	62	0	0
01-janv	3	26,2	2	90	62	0	0
01-janv	4	26,3	3	80	63	0	0
01-janv	5	26,3	4	70	56	0	0
01-janv	6	26,3	4	70	63	3	3
01-janv	7	28	4	70	64	61	20
..	
31-déc	17	30,5	6	70	61	150	35
31-déc	18	29,6	5	90	62	73	28
31-déc	19	29	5	90	62	7	5
31-déc	20	28,6	3	80	62	0	0
31-déc	21	28,1	4	80	63	0	0
31-déc	22	28	4	90	64	0	0
31-déc	23	27,3	2	80	63	0	0

Il faut noter que la création du fichier météorologique annuel type a nécessité un traitement particulier des mesures opérées par Météo France. Dans ces mesures, seule la valeur du rayonnement global horizontal est relevée. Or on sait que le rayonnement direct a une contribution énergétique prépondérante pour les climats tropicaux. Il est donc nécessaire de traiter les données Météo France et de décomposer le rayonnement global en rayonnement direct et diffus. Un modèle original de décomposition a été élaboré et testé dans le cadre du projet COBIOPOL. Ce modèle est présenté ci-après.

3.3. Modèle de décomposition du rayonnement solaire

Les mesures d'ensoleillement effectuées par Météo France sont généralement des mesures d'irradiation globale horizontale (I_{G_h}) et d'irradiation diffuse (I_{d_h}). De ces deux valeurs on peut, par soustraction, déduire l'irradiation directe (I_{b_h}) et ainsi connaître les principales contraintes sur les bâtiments à Tahiti. Cependant, Météo France ne mesure plus l'irradiation diffuse (I_{d_h}) depuis 2006, ce qui a motivé la recherche d'un modèle mathématique de décomposition du rayonnement solaire permettant, à partir de la mesure de l'irradiation globale seule, de retrouver l'irradiation diffuse et directe.

L'irradiation directe (I_{b_h}) provient directement du disque solaire tandis que l'irradiation diffuse (I_{d_h}) est composée du rayonnement diffusé par la voûte céleste (atmosphère et nuages) et/ou réfléchi par le sol ou les bâtiments voisins. La **Figure 2** montre un exemple d'une journée d'irradiation où apparaissent les deux composantes et leur somme.

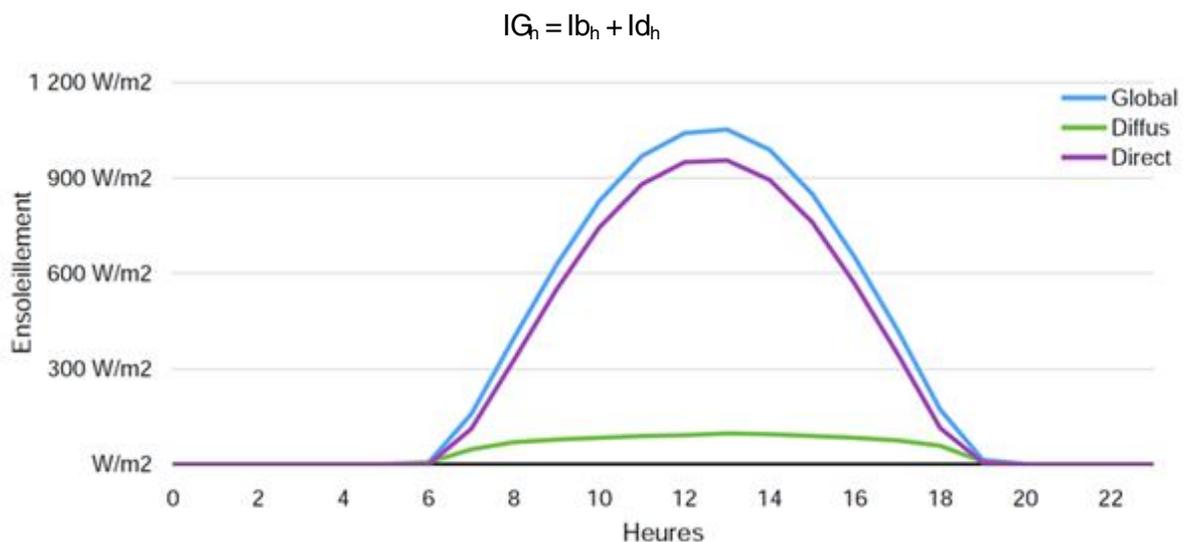


Figure 2 : Exemple d'une journée d'ensoleillement par temps clair (données Météo France)

Dans la littérature, plusieurs modèles mathématiques ont été proposés, plus ou moins adaptés à certaines régions du globe. Ces modèles utilisent l'indice de clarté k_t et l'indice de fraction diffuse k_d pour obtenir l'irradiation diffuse et directe à partir de la mesure de l'irradiation globale :

- l'indice de clarté k_t , est le rapport entre irradiation globale horizontale I_{G_h} et irradiation globale extraterrestre I_{G_0} . I_{G_0} ne dépend que des paramètres astronomiques, elle varie suivant la distance Terre-Soleil due à l'ellipticité de la trajectoire de la Terre autour du soleil :

$$k_t = I_{G_h} / I_{G_0}$$

- l'indice de fraction diffuse k_d est défini par :

$$k_d = I_{d_h} / I_{G_h} \quad \text{donc } I_{d_h} = I_{G_h} \times k_d$$

Trois modèles mathématiques ont été testés :

- le modèle d'Erbs [Erbs 1982] donné par les relations suivantes :

$$k_d = 1 - 0,09 k_t \text{ si } k_t \leq 0,22$$

$$k_d = A + B k_t + C k_t^2 + D k_t^3 + E k_t^4 \text{ si } 0,22 < k_t \leq 0,8$$

$$k_d = 0,165 \text{ si } k_t > 0,8$$

avec : A=0,9511 ; B= - 0,1604 ; C=4,388 ; D= - 16,638 ; E= 12,336

- Le modèle DIRINT de Perez [Perez 192] : L'application de ce modèle nécessite la toolbox Matlab PV_LIB qui contient la fonction *pvl_dirint*. La fonction *pvl_dirint* permet de calculer le rayonnement direct normal à partir du rayonnement global, de l'angle du zénith, de la pression atmosphérique et de la température de rosée. Cette dernière peut être calculée à partir de la température ambiante (air sec) et de l'humidité relative. L'angle du zénith est calculé à partir d'un fichier McClear, qui calcule pour une année avec un pas de temps horaire l'irradiation globale, diffuse, directe horizontale et directe inclinée par ciel clair. Le rapport des deux dernières valeurs donne l'angle du zénith horaire. Le modèle DIRINT apparait comme la référence en matière de décomposition du rayonnement solaire. Il est très largement utilisé dans la communauté scientifique et les outils d'analyse du rayonnement solaire.
- Un modèle original désigné par « modèle PF », basé sur une fonction exponentielle et dérivé du modèle établi par Météo France en Nouvelle Calédonie.

$$k_d = \frac{1}{1 + \exp(c_0 k_t + c_1)}$$

Pour chaque modèle testé, la méthodologie employée est d'approcher les coefficients (de A à E pour Erbs, et c_0 et c_1 pour le modèle exponentiel). Les coefficients sont automatiquement calculés par la fonction *pvl_dirint* pour le modèle DIRINT en faisant une approximation des moindres carrés à partir des données d'une année de référence. On obtient ainsi :

- Des valeurs corrigées des coefficients du modèle Erbs : A= 0,11 ; B= 6,06 ; C= - 17,6 ; D= 14,5 ; E= - 2,3
- Les coefficients du modèles PF : $c_0= 7,122$ et $c_1= - 3,511$.

Quatre tests sont effectués, dans lesquels l'année de référence pour calculer les coefficients est différente. On commence par prendre l'année 1993 comme année de référence, puis à l'aide des coefficients obtenus, le modèle est utilisé pour les autres années (1997 à 1999) et voir si l'accord entre valeurs modélisées et valeurs observées est correct.

On reprend la même démarche en prenant maintenant l'année 1997 comme référence et on obtient d'autres coefficients. L'accord entre modèle et observations est ainsi évalué pour les années 1993, 1998 et 1999.

La démarche est réitérée avec comme année de référence 1998 puis 1999.

Les résultats obtenus montrent que le modèle qui s'approche le plus des valeurs mesurées par Météo France est le « modèle PF » (Tableau 1 et Figure 3), avec les meilleurs coefficients calculés en prenant pour année de référence 1997.

Sous le format EXCEL, le fichier météorologique annuel type n'est pas exploitable par le logiciel EnergyPlus que nous utiliserons pour nos simulations dynamiques. Deux étapes de conversion sont nécessaires avant d'obtenir le fichier annuel au format .epw, compatible avec EnergyPlus.

Tableau 1 : Modèle exponentiel, année de référence : 1997 ; $c_0=7.122$ et $c_1=-3.511$

	Moyenne du rayonnement direct horizontal [W/m^2]	MBE	rMBE	RMSE	rRMSE	R ²
Yt1=1993	353	-11	-0,032	63	18,0%	0,972
Yt2=1998	324	-6.4	-0,020	57	17,6%	0,975
Yt3=1999	354	1.4	0,004	59	16,6%	0,976
Moyenne	344	-5.4	-0,016	60	17,4%	0,974

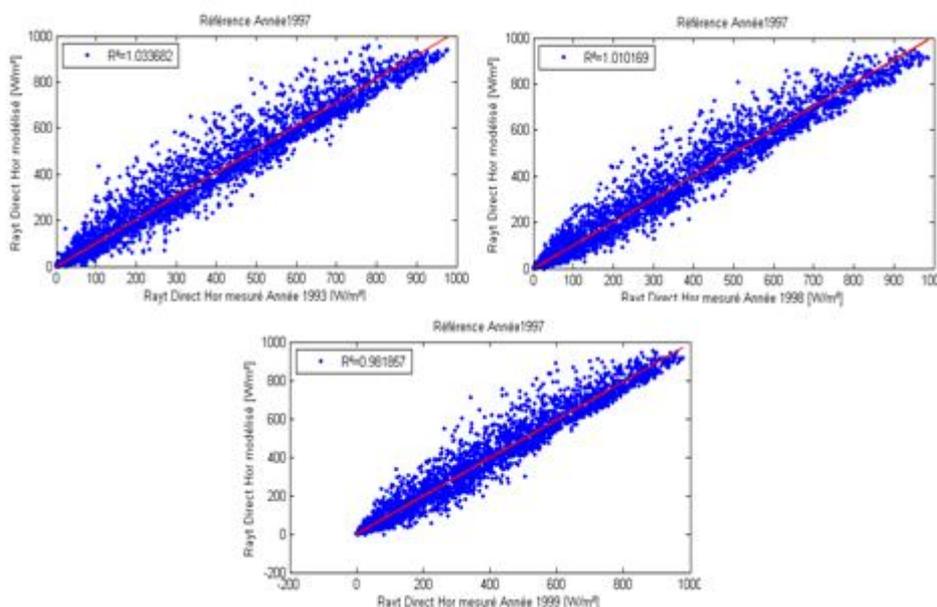


Figure 3 Rayonnement Direct Horaire (RDH) modélisé vs Rayonnement Direct mesuré et régressions linéaires, année de référence 1997

3.4. Génération du fichier .epw

Sous le format EXCEL, le fichier météorologique annuel type n'est pas exploitable par les logiciels de simulation thermique dynamique (STD) tels qu'EnergyPlus. Ce logiciel, couramment utilisé par les bureaux d'études réalisant des études de STD, requiert un format de fichiers météorologiques standardisé. Ces fichiers ont une extension « .epw ». Nous allons expliciter ci-dessous la procédure permettant de générer des fichiers utilisables par les codes de STD au format .epw. Il faut noter que cette procédure est aussi applicable pour convertir des fichiers météorologiques bruts obtenus à l'aide de stations météorologiques autonomes. Plusieurs outils sont disponibles pour réaliser la conversion de fichiers Excel en format .epw.

L'Outil exécutable EPWcreator présenté sous forme de macro Excel permet de créer le fichier « .epw » à partir d'un fichier excel en une seule opération. Les données du fichier de départ doivent être horaires.

Une deuxième procédure utilisant l'environnement MATLAB est possible. Deux étapes de conversion sont nécessaires avant d'obtenir le fichier TMY au format « .epw », compatible avec

EnergyPlus. L'utilitaire Weather Data Converter d'*EnergyPlus* permet de convertir un fichier météo en fichier « .epw ». Cependant les données Météo France que l'on veut exploiter sont au format Excel qui n'est ni compatible avec *EnergyPlus* ni avec son utilitaire. On a donc recours à la toolbox *xls2toTMY2-ver2* qui permet de convertir un fichier .xls en fichier .tm2. Ce dernier format est ensuite converti par *EnergyPlus* en format .EPW.

La conversion en fichier .tm2 fait appel à la fonction *convertweather_ver2*. Celle-ci crée de toute pièce le fichier TMY2 à partir d'un fichier Excel qui regroupe les données mensuelles ou annuelles de Météo France que l'on veut reformater. Pour cela, il faut rentrer les données climatiques dans le fichier Excel *abc--August 2001* pour un fichier mensuel et *abdesd 2011* pour un fichier annuel. Pour que la fonction reconnaisse le fichier, il faut le placer dans le dossier *monthly* (resp. *yearly*) et changer le nom du mois (resp. année) en conservant le format *abc--MMM YYYY* (resp. *abdesd YYYY*).

Pour lire le fichier TMY2 généré, on utilise la macro « TMY2 » créée par l'Université d'Écosse et disponible sur le site de l'université du Wisconsin. Elle permet d'agencer correctement les données sur Excel et de visualiser les données du fichier TMY2.

4. DONNEES METEO EXTRAPOLEES PAR UN MODELE DE MESO-EHELLE

Le modèle climatique est une représentation numérique du système climatique fondée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et sur leurs processus d'interaction. Il permet de calculer les paramètres climatiques avec une résolution spatiale très fine [Hopuare et al, 2015]. La validité des résultats est obtenue par comparaison avec des mesures locales. La Figure 4 : Schéma d'un modèle de climat illustre le principe d'une simulation numérique du climat.

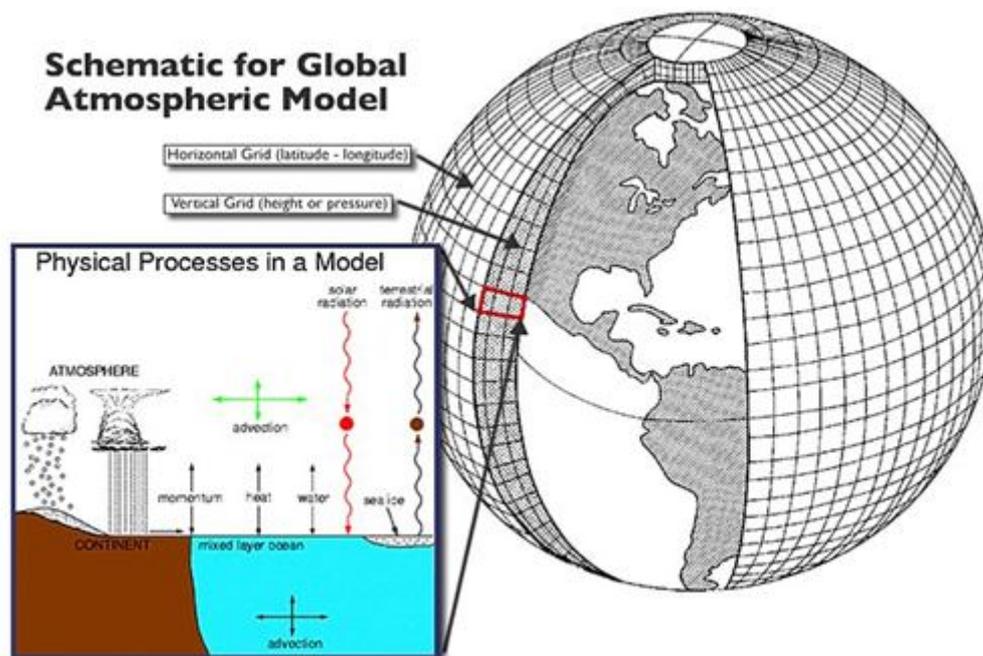


Figure 4 : Schéma d'un modèle de climat

4.1. Méthodologie

La disponibilité des données météorologiques in situ étant restreinte à une seule station, l'outil modèle numérique de climat est une voie qu'il faut expérimenter. Il faudra ensuite organiser des campagnes de mesures dédiées à la validation de cet outil.

En appliquant une méthodologie bien définie, la "sortie" du modèle fournit en chaque point d'une "grille" (points régulièrement espacés sur Tahiti selon un quadrillage) les différents paramètres climatiques : la température, l'humidité relative, le vent, l'ensoleillement... Il faut néanmoins garder à l'esprit qu'un modèle de climat est une simplification de la réalité, il peut fournir des informations pertinentes, mais il comporte aussi des limites.

Le modèle de climat WRF (Weather Research Forecast Model, [Skamarock et al 2008](#)) utilisé dans cette étude s'apparente à un modèle de prévision numérique du temps, comme ceux utilisés par les prévisionnistes de Météo France. WRF est un modèle non-hydrostatique à aire limitée permettant de faire un zoom sur une région particulière.

A l'intérieur même de la zone d'intérêt on peut implémenter d'autres domaines plus petits dans lesquels la résolution peut être augmentée. On obtient ce qu'on appelle une "cascade de descente d'échelle" jusqu'à atteindre la résolution spatiale voulue dans le dernier domaine qui est centré sur la région d'étude ([Figure 5](#)). La résolution spatiale est la dimension (en km) d'une grille.

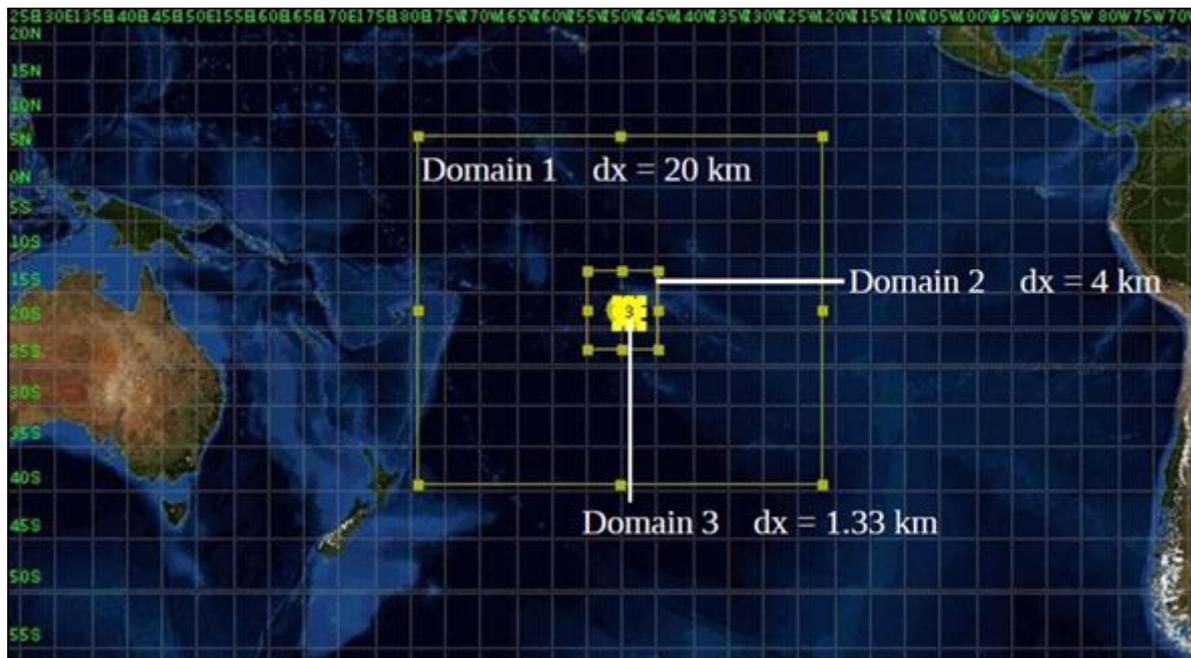


Figure 5 : Schéma de la descente d'échelle avec WRF positionné sur une large région Pacifique central à 20 km de résolution et comme conditions aux bords la réanalyse Era Interim. Un deuxième domaine est implémenté à 4 km de résolution et positionné sur la Polynésie française. Un dernier domaine est implémenté dans le domaine 2 à 1.3 km centré sur Tahiti.

Les modèles numériques du climat sont généralement globaux, c'est-à-dire qu'ils simulent le climat sur tout le globe ([Figure 4](#)). Lorsqu'on effectue des simulations climatiques, passées ou futures, sur un domaine limité, il est impératif de définir les conditions de grande échelle, c'est-à-dire celles imposées aux bords du domaine considéré (domaine 1 sur la [Figure 5](#)). Ces conditions aux limites proviennent d'un jeu de données spécifiques appelées réanalyses. Il s'agit d'un mixte entre observations (in situ et satellite) et sorties de modèle de prévision numérique du temps. Par exemple, la réanalyse Era Interim du Centre Européen utilisée dans cette étude est le résultat d'un modèle global de prévision du temps rejoué sur la partie passée (depuis 1979) et ajusté grâce aux données réellement observées à la même période. Les données de réanalyses sont donc disponibles

sur tout le globe à une résolution d'environ 80km. Malheureusement, à cette résolution sur la Polynésie française, aucun relief n'est pris en compte et les îles sont considérées comme des points d'océan.

L'objectif est d'obtenir à partir des conditions de grande échelle (réanalyses, résolution 80km) des simulations à une résolution plus pertinente de 1,3 km grâce au modèle WRF.

Le modèle demande des ressources énormes de calcul et de stockage. Une étude spécifique sur les régimes de vents à Tahiti a été menée pour limiter la longueur des simulations et économiser le temps de calcul.

4.2. Identification des régimes de vents dominants à Tahiti

Dans un premier temps les données de réanalyses Era Interim ont été traitées pour identifier les régimes de vents les plus fréquents à Tahiti. Une méthode statistique sur une série temporelle de 31 ans (79-09) nous a permis d'isoler six régimes principaux (Figure 6). Nous avons soumis cette étude au bureau Clime-Etude de Météo France qui a validé ces six régimes ainsi que leur fréquence d'occurrence.

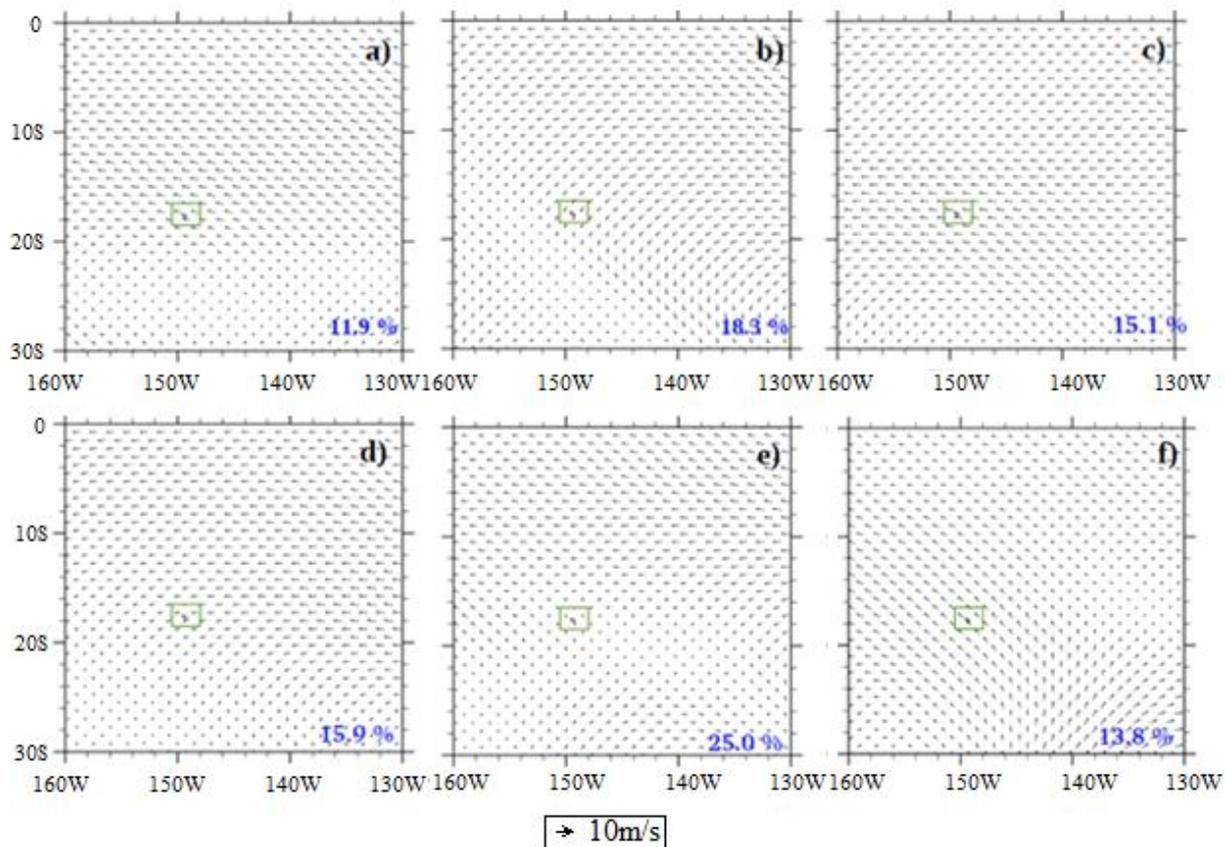


Figure 6 : Régimes de vents à 10m Era Interim sur un grand domaine Polynésie. La boîte verte localise Tahiti.

En bleu sont indiquées les fréquences d'occurrence de ces régimes en pourcentage.

4.3. Descente d'échelle

Les données de réanalyses Era Interim pour les cinq dates les plus proches de la moyenne de chaque régime de vent ont été récupérées et appliquées comme conditions au bord du domaine WRF. On dispose ainsi de 5 journées simulées pour chacun des régimes. On en fait la moyenne, ce qui donne une carte de vent pour chaque régime à 1,3 km de résolution.

Pour un des régimes, une simulation plus longue a été lancée dans le but de la comparer avec les données de la station Faaa sur plusieurs journées consécutives. La comparaison entre données du modèle et station météo (température et vent) a mis en avant les imperfections du modèle, notamment en ce qui concerne la représentation encore trop approximative du relief de l'île de Tahiti utilisée dans le modèle. La [Figure 7](#) montre le relief pris en compte par la modélisation.

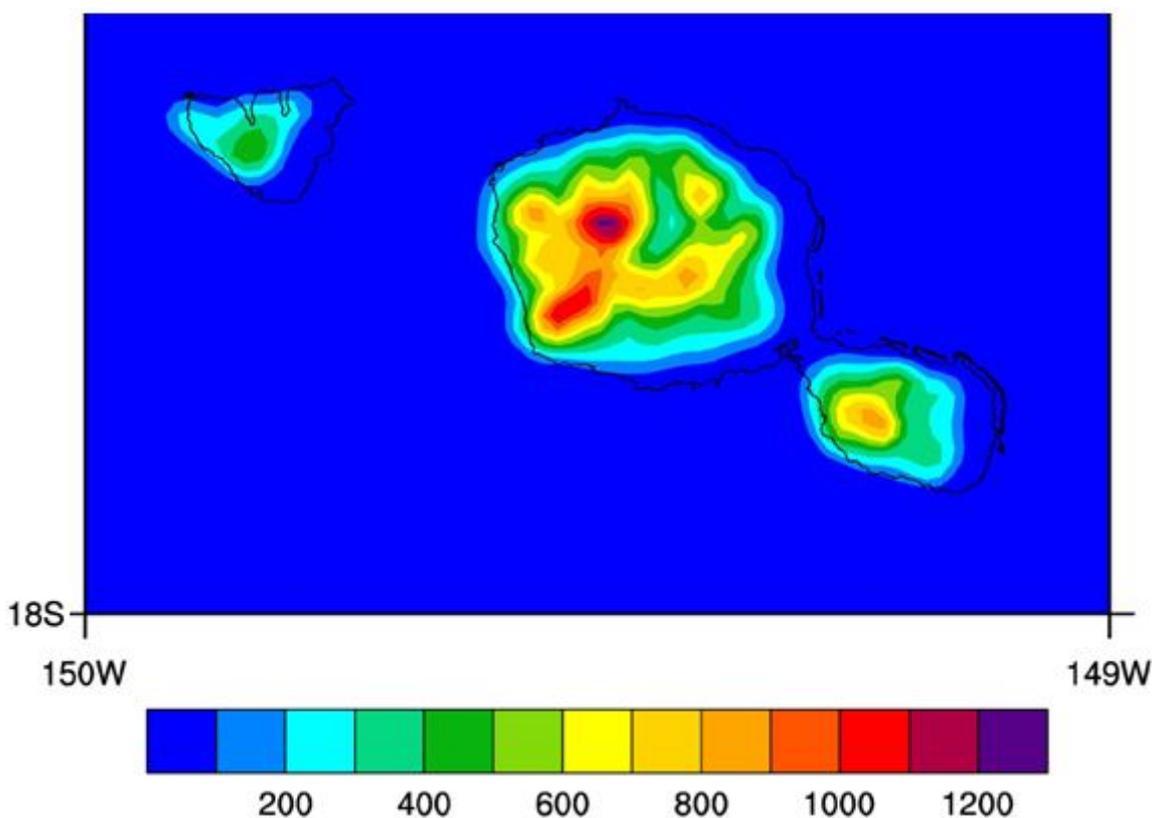


Figure 7 : Relief implémenté dans le modèle WRF

Même si des améliorations sont à envisager, la descente d'échelle avec WRF a permis d'obtenir des cartes de vent plus précises et fiables, mettant en avant le contraste au vent/sous le vent pour les régimes de vent d'est et de nord-est déjà bien connu des habitants mais impossible à visualiser avec les relevés d'une seule station météo ([Figure 8](#)). Cette étude a mis en avant le potentiel de ventilation naturelle sur toute l'île de Tahiti dont voici la synthèse :

Côte Nord et Est :

- faible vent 25 % du temps
- fort vent 40,8 % du temps
- vent modéré 34,2 % du temps

Côte Sud :

- faible vent 43,3 % du temps
- fort vent 40,8 % du temps
- vent modéré 15,9 % du temps

Côte Ouest :

- faible vent 67,9 %du temps
- fort vent 18,3 %du temps
- vent modéré 13,8 %du temps

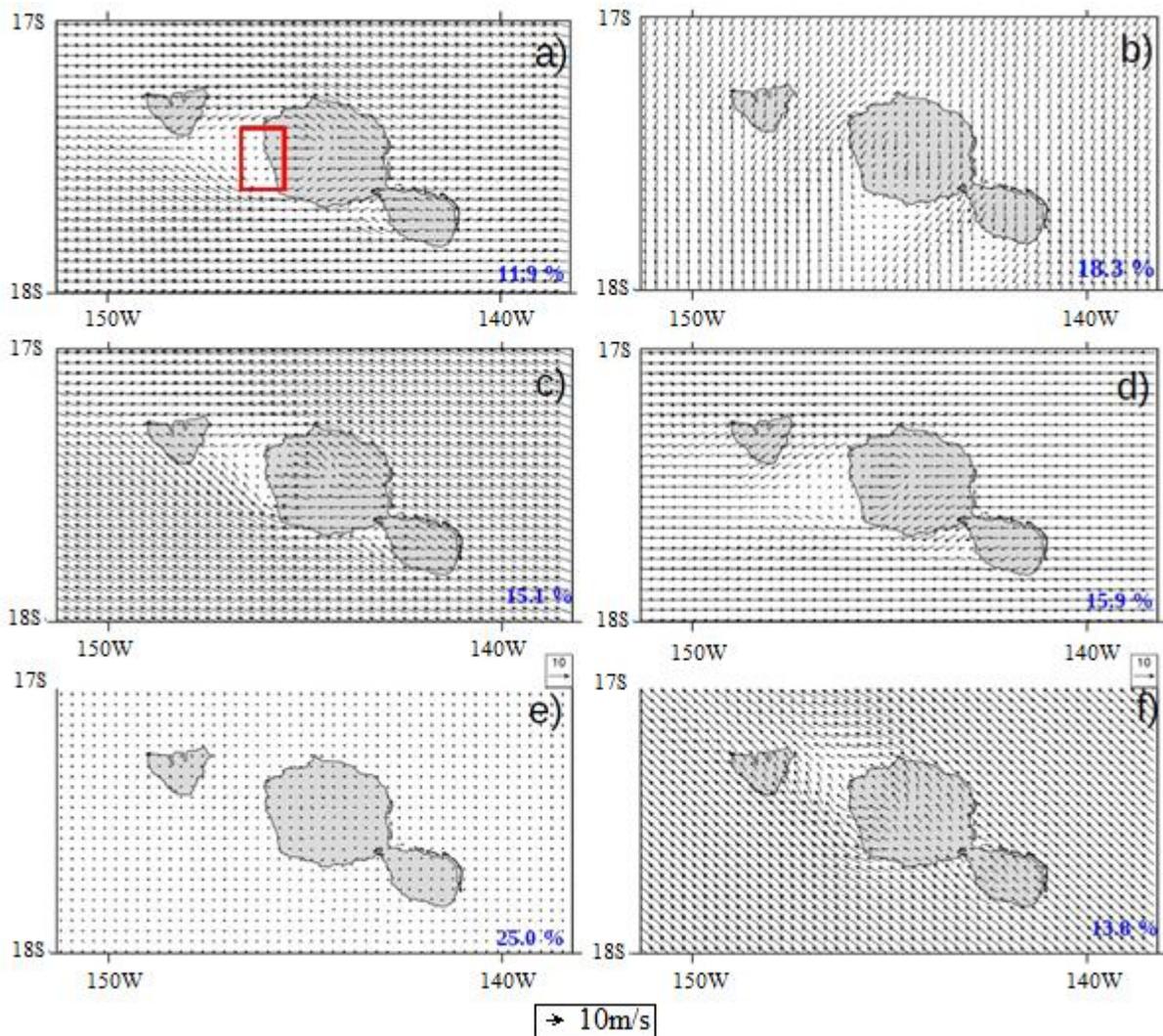


Figure 8 : Régimes de vents à 1.3 km de résolution simulés avec le modèle WRF (issues des six régimes de vent de la réanalyse Era Interim)

Cette étude sera présentée à la conférence Climat2016 qui se tiendra au Danemark du 22 au 25 mai 2016 et sera publiée dans la revue de la conférence [Hopuare et al, 2016].

4.4. Validations

Cette partie confronte les valeurs obtenues l'aide des modèles de climats à des données mesurées soit par Météo France soit à l'aide des stations météorologiques autonomes du laboratoire GEPASUD acquises lors de ce programme.

4.4.1. Confrontation avec les données de la station Météo France de Faa

Pour le régime 3, une simulation plus longue a été lancée dans le but de la comparer avec les données de la station Faa sur plusieurs journées consécutives, du 16 au 20 janvier 2001.

Les séries chronologiques de température à 10 m et de direction et de vitesse du vent relevées à Faa et celles obtenues en deux points de grille du modèle sont sur la [Figure 9](#).

Pour la température, le point de grille le plus proche de la station de Faa (voir [Figure 9](#)) est le mieux corrélé : 0,65. En revanche pour le vent, le point de grille le mieux corrélé (0,46) est situé au sud-ouest de la station, en mer ([Figure 10](#)). L'erreur quadratique moyenne est de 2°C pour la température et de 2,4 m/s pour le vent zonal à 10 m. Ces écarts pourraient provenir de la précision du relief implémenté dans WRF. En effet, le point de grille le plus proche de la station se trouve à 117m d'altitude alors que la station de Faa est située à l'altitude 2m. Le point de grille en mer le mieux corrélé avec le vent zonal observé est à 67 m (et non pas au niveau de la mer).

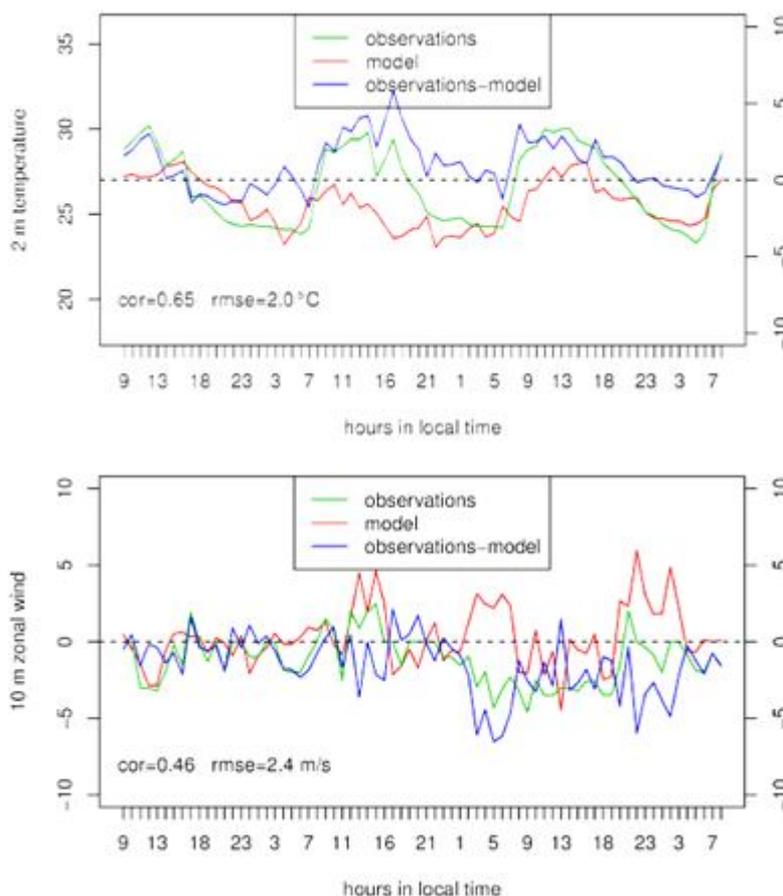


Figure 9 : En haut, séries temporelles de la température observée (courbe verte) et modélisée au point de grille le plus proche de la station (courbe rouge). En bas, vent zonal à 10 m observé (courbe verte) et modélisé au point de grille au sud-ouest de la station (courbe rouge). L'écart entre observation et modèle est représenté par une courbe bleue.

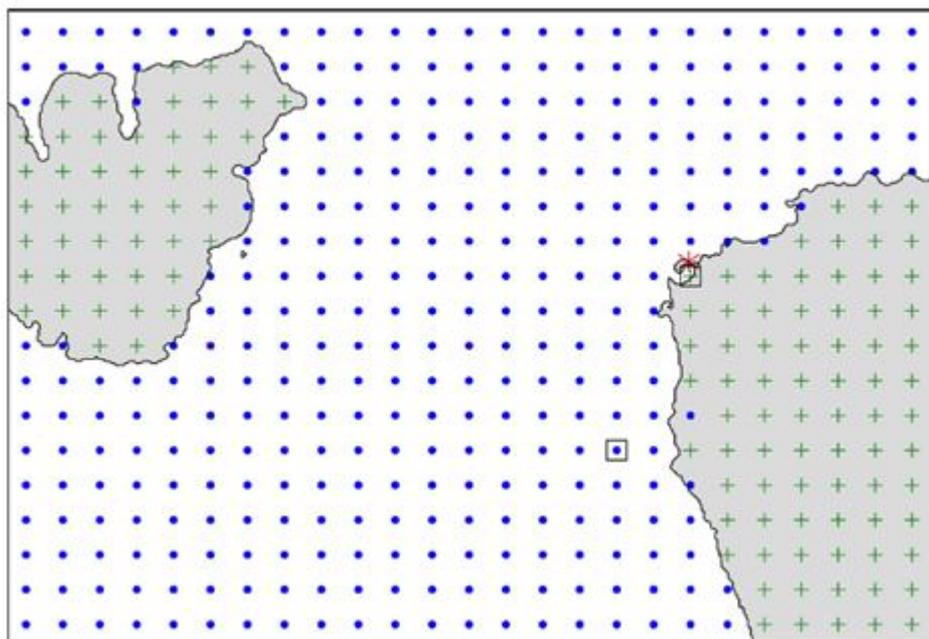


Figure 10 : Grille du modèle (domaine à 1,33 km de résolution) zoomée sur la partie nord-est de Tahiti. Les points bleus représentent les points de mer, les croix vertes les points de terre. L'astérisque rouge indique la station de Faaa. Une boîte noire entoure le point de grille le plus proche de la station, le mieux corrélé en terme de température avec la station de Faaa. Une autre boîte noire entoure le point de grille plus au sud-ouest, le mieux corrélé avec la station de Faaa en terme de vent.

4.4.2. Confrontation avec les stations mobiles installées et les parcs mobiles

Un autre projet prévu pour valider le modèle sera de lancer des simulations sur quelques jours consécutifs qui coïncideraient avec la période de mesure des stations mobiles installées sur Tahiti et Moorea. Ces stations ont en effet relevé des données de température, d'humidité relative, de direction et vitesse de vent, de rayonnement global horizontal au cours de l'année passée sur plusieurs sites notamment quelques écoles de Moorea, au musée de Tahiti, etc. Ces données pourront être prochainement comparées à celles du modèle, qui les calcule en chaque point de grille.

De plus, les 12 mois de l'année-type seront modélisés avec WRF à la résolution de 4 km et seront disponibles fin avril. Le fichier contenant l'orographie plus précise de Tahiti est déjà disponible mais son implémentation dans le modèle nécessite un certain nombre d'ajustements et de mise au format dont on ne saurait estimer précisément la durée.

De plus, plusieurs sites d'installations photovoltaïques pourront être utilisés pour comparer le rayonnement global observé et simulé par le modèle grâce à la relation entre production photovoltaïque et ensoleillement établie.

Partie 2 : conception bioclimatique

5. INTRODUCTION

5.1. Principes et objectifs de l'étude

Cette partie traite de l'étude de la conception bioclimatique des bâtiments en Polynésie française. La méthodologie utilisée combine des campagnes de mesures in situ et de la simulation numérique.

En préambule, **l'étude expérimentale** est inévitable. Elle est indispensable pour mesurer, en conditions réelles, les paramètres physiques qui caractérisent les performances des bâtiments d'un point de vue du confort. Cette étape consiste notamment à mesurer la réponse thermique, hydrique et aéraulique d'un bâtiment donné, en fonction de sollicitations climatiques réelles. Il s'agit, par exemple, d'identifier des anomalies de conception ou des pathologies récurrentes qu'il serait nécessaire de traiter.

Dans un second temps, on utilise **la simulation numérique** en complément. La représentation numérique du comportement thermique, hydrique et aéraulique d'un bâtiment permet de proposer des solutions pour corriger les défauts de conception en termes par exemple d'isolation thermique ou de ventilation. En premier lieu, le modèle numérique doit être capable de simuler correctement les situations réelles sur lesquelles ont été menées les études expérimentales. Simulation et mesures expérimentales doivent impérativement coïncider. Cette phase de validation est fondamentale. Lorsque le modèle est validé, on peut alors simuler des améliorations de la conception du bâtiment et, éventuellement, étudier des systèmes plus complexes avec des sollicitations très variées. Le modèle permet donc d'aller « plus loin » que les mesures. Dans notre cas, les simulations seront menées sur l'outil de simulation dynamique des bâtiments ENERGY PLUS développé par l'*US Department of Energy* et largement validé par la communauté scientifique. Dans cette étude, la simulation aéraulique ne sera pas traitée intégralement car elle est complexe et demande une étude plus poussée que nous abordons actuellement par le biais d'une thèse de doctorat qui a débuté en janvier 2016 et qui constitue une prolongation du programme COBIOPOL.

5.2. Les typologies de bâtiments

Deux typologies de bâtiments ont été retenues pour cette étude en raison des enjeux énergétiques qu'elles représentent. L'habitation traditionnelle appelée *fare*, ou faré, et les bâtiments d'écoles communales.

Le **Faré** est particulièrement répandu sur Tahiti. L'Office Polynésien de l'Habitat a conçu des modèles de farés en F2, F3 et F4. La conception de ces farés a déjà fait l'objet d'études mais son adaptation à une future réglementation énergétique n'a pas été abordée.

Les conditions de confort dans les **écoles** en saisons chaudes posent parfois des problèmes et des débats sont régulièrement lancés sur l'éventualité de climatiser les salles de classe de la Polynésie française. Cette perspective peut avoir un impact énergétique et économique majeur. La climatisation d'une salle de classe représente une consommation énergétique entre 4 000 et 8 000 kWh/an/salle et un coût entre 140 000 et 290 000 CFP/an/salle, suivant les qualités thermiques du bâti. L'objet de cette étude est d'évaluer les possibilités de confort dans les salles de classe afin d'éviter l'installation de climatiseurs.

5.3. Les sollicitations climatiques des bâtiments en PF

Ce point a été longuement décrit en première partie mais résumons ici la situation. Le climat de l'archipel de la Société est du type tropical humide. Il se compose de deux saisons, une saison

« chaude » et une saison « fraîche ». La saison chaude coïncide avec une humidité plus importante entre novembre et avril. La saison fraîche s'étend de mai à octobre, période durant laquelle les précipitations sont moins fréquentes. Les températures annuelles sont chaudes avec une moyenne de 26°C et des maxima qui varient entre 22°C et 30°C. L'humidité relative moyenne journalière varie de 60% à 92%. La Polynésie reçoit un fort ensoleillement de l'ordre de 5kWh/m²/jour. Le vent souffle majoritairement de la direction est-nord-est avec une vitesse comprise entre 7 et 20 km/h suivant le site.

5.4. Les Outils expérimentaux

Des campagnes d'expérimentations ont été menées sur les bâtiments d'habitation et sur les écoles. Dans les deux cas, les conditions à l'intérieur (mesures des conditions météorologiques) et à l'extérieur (mesures des conditions d'ambiance) ont été mesurées à l'aide de différents capteurs présentés et décrits ci-après.

5.4.1. Mesure des conditions météorologiques

Elles sont réalisées par des stations météo autonomes, sans fil, Davis Vantage Pro 2 - 6152 FR, comportant un mât de mesure et une console d'acquisition et de stockage des données (Figure 11).



Figure 11 : station de mesure autonome de données météorologiques

Les mesures des conditions climatiques extérieures sont récapitulées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Mesures des conditions climatiques

CAPTEURS	Résolution	Plage	Précision
Humidité extérieure	1 %	10 à 90 %	5 % RH
Précipitation	0,25mm à 1999,99 mm	0 à 19,99 mm	4 %
Rayonnement solaire	1 W/m ²	0 à 1800 W/m ²	5 %
Température Extérieure	0,1 °C	-40 °C à +60 °C	0,5 °C
Anémomètre	0,5 m/s	1,5 à 79 m/s	5 %

5.4.2. Mesure des conditions d'ambiance intérieures

Elles sont réalisées par des « totems confort » et des capteurs autonomes de température et d'humidité relative appelés « datalogger ».

Le totem confort (Figure 12) permet d'enregistrer la température ambiante, la température de globe noir (moyenne pondérée de la température ambiante et de celle des parois), vitesse du vent, taux d'humidité et la luminosité. Les sondes sont disposées sur une armoire et le système d'acquisition des sondes, une centrale GRAPHTEC « GL220 », à l'intérieur de celle-ci. L'archivage des données s'effectue toutes les 10mn. Le pas de temps a un effet sur la capacité de stockage de la mémoire. Pour des raisons de sécurité la console d'acquisition de la station météorologique est parfois installée dans l'armoire du totem confort.

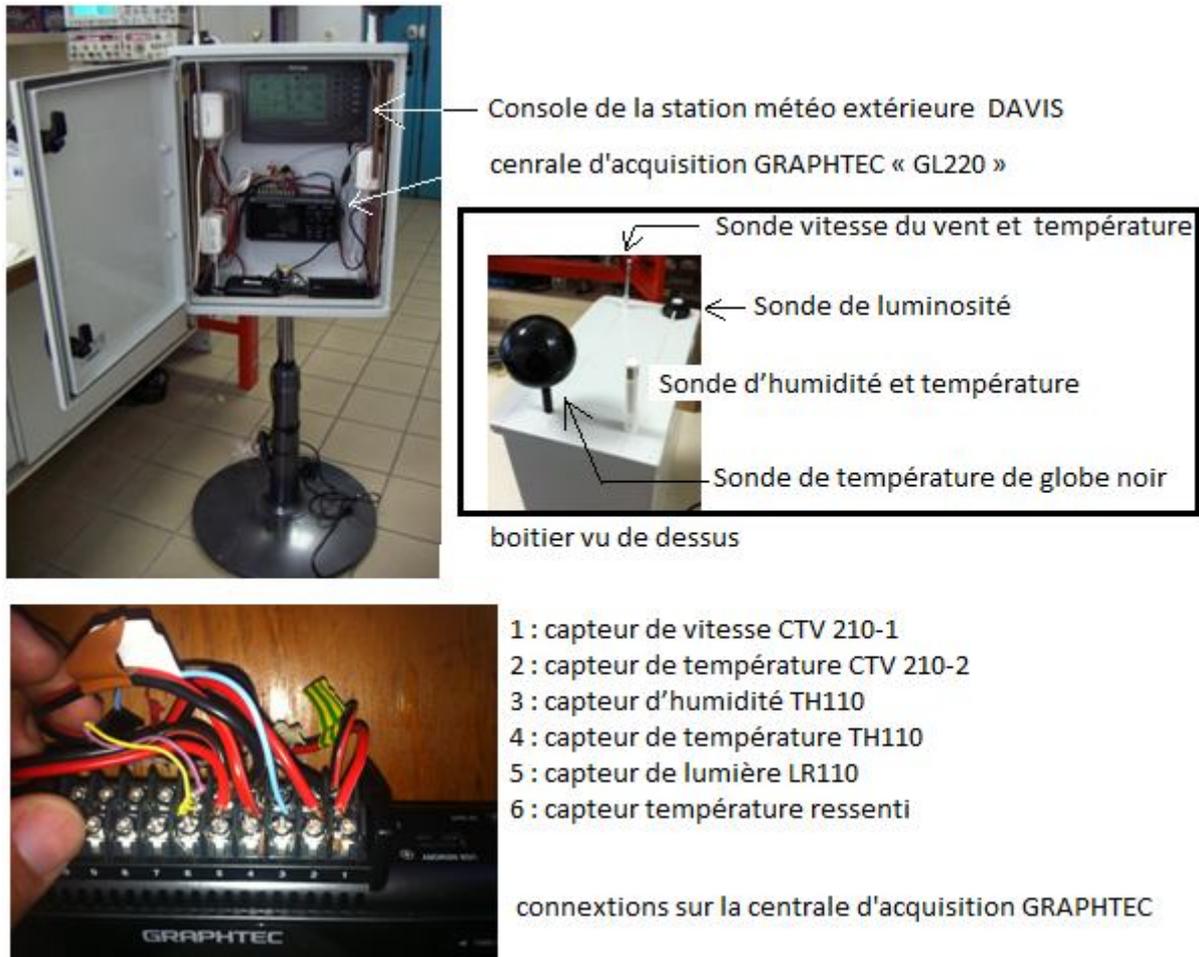


Figure 12 : présentation du totem de confort, capteurs associés et connexions

Les enregistreurs autonomes de température et humidité (Figure 13) permettent de réaliser des mesures de température et d'humidité relative avec un encombrement très réduit. Ils sont généralement disposés sur des murs intérieurs ou suspendu au plafond.



Figure 13 : Datalogger sans et avec affichage

5.5. Outils numériques

L'outil de simulation thermique dynamique (STD) choisi pour cette étude est EnergyPlus (Crawley et al, 2001). EnergyPlus est un outil de simulation permettant de prévoir le comportement énergétique de bâtiments basé sur les outils BLAST 1 et DOE-2 développés dans les années 80. EnergyPlus permet de modéliser des bâtiments comportant plusieurs zones thermiques (multizones) ainsi qu'un grand nombre de composants : pour le chauffage, le refroidissement, l'éclairage, la ventilation et de nombreux autres flux d'énergie. Il permet d'effectuer les simulations avec un pas de temps inférieur à l'heure, de modéliser des systèmes énergétiques complexes, d'analyser le confort thermique et de gérer la ventilation mécanique et naturelle. La structure d'EnergyPlus est présentée à la Figure 14.

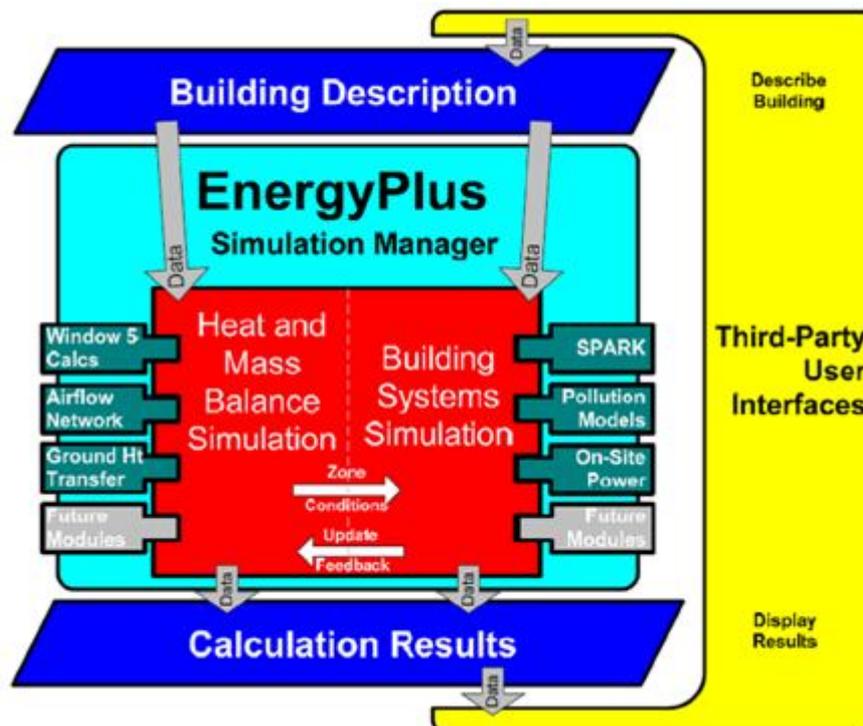


Figure 14 : Structuration de l'outil Energyplus



Figure 15 : vue et plan de l'habitation traditionnelle

6. ETUDE DU FAREMTR

6.1. Description de la typologie habitation

Le faré (Figure 15) est de type F4 avec une surface habitable d'environ 72m² et une terrasse de 18m². Il est composé de 3 chambres, 1 séjour, 1 salle de bain, wc et 1 cuisine. Le logement est situé sur la commune de Puna'auia à Tahiti, en fond de vallée, à 2km de la côte et à une altitude de 66m.

6.1.1. Composition de la structure et des murs

La structure générale du faré est en bois. Les murs sont composés par des SMARTPANEL d'une épaisseur 7/16 pour la partie extérieure. Des panneaux sans amiante, à base de silicate de calcium renforcé de fibres cellulosiques d'une épaisseur de 6mm, constituent la partie intérieure du logement. Le plancher est réalisé avec des panneaux hydrofugés sans amiante à base de silicate de calcium renforcé de fibres cellulosiques d'une épaisseur de 20mm. Les caractéristiques des matériaux sont résumées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : description de la composition des murs et du plancher

Matériaux	Bardage bois	Lame d'air	Panneau intérieur	Plancher
Epaisseur (m)	0,011	0,065	0,006	0,02
Conductivité (Wm ⁻¹ .°C ⁻¹)	0,14		0,19	0,19
Masse volumique (kg.m ⁻³)	530		1180	1100
Chaleur massique (J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	1630		1018	980

6.1.2. Les menuiseries

Les ouvertures de type fenêtre et porte fenêtre (baie vitrée) sont constituées avec un simple vitrage de 6 à 8mm d'épaisseur. Le cadre des ouvertures est en aluminium. Chaque fenêtre est équipée de persiennes. Les fenêtres mesurent 1,30m de haut et 1,42m de large avec une épaisseur de vitrage de 6mm. Le logement possède 3 fenêtres sur la façade Nord, 2 fenêtres sur la façade Est, 1 fenêtre sur la façade Ouest et 2 fenêtres sur la façade Sud. La baie vitrée mesure 1,8m de haut et 1,42m de large et se situe sur la façade Nord. La façade Sud est également composée d'une louvre

mesurant 0,4m de haut et 1,42m de large et de 2 portes. Cela représente une surface vitrée d'environ 18m² sur la totalité du logement. Les caractéristiques des menuiseries sont résumées dans le [Tableau 4](#).

Tableau 4 : détails des menuiseries

Matériaux	Vitre fenêtre	Vitre baie	Louvre
Epaisseur (m)	0,006	0,008	0,006
Dimension H x Lar. (m)	1,3 x 1,42	1,8 x 1,42	0,4 x 1,42

6.1.3. La toiture et faux plafond

La couverture du faré est réalisée en tôle ondulée d'une épaisseur de 55/100 avec une teinte claire. Le faux plafond est constitué de panneaux de lambris à PVC blanc, d'une épaisseur de 10mm. Le [Tableau 5](#) présente quelques paramètres relatifs à la toiture et au faux plafond

L'isolant utilisé dans le Faré est du type Durafoil, qui est une paroi mince réfléchissante (PMR). Une discussion sur les précautions d'emploi de ce type d'isolant, très répandu en Polynésie française et dont les performances peuvent être discutables, est proposée en annexe.

Tableau 5 : détail de la composition de la toiture et du faux plafond

Matériaux	Toiture tôle	Faux-plafond
Epaisseur (m)	0,00075	0,01
Conductivité (Wm ⁻¹ .°C ⁻¹)	45,28	0,16
Masse volumique (kg.m ⁻³)	7824	1200
Chaleur massique (J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	500	1600

6.2. Analyse des résultats expérimentaux

Les campagnes de mesures réalisées dans le faré OPH a eu lieu en deux temps, une en saison fraîche, une en saison chaude. L'échantillonnage des mesures était de 10mn soit près de 2300 lignes de mesures. Les couples (température, humidité relative) sont tracés dans le diagramme de Givoni présenté ci-dessous ([Figure 16](#)). Ce graphe, présente, dans le diagramme psychrométrie (Température versus Humidité spécifique), les zones assurant une sensation de confort thermique acceptable pour une vitesse d'air de 0 m/s (zone verte), 0,5m/s (zone jaune) et 1m/s (zone rouge). Les relevés montrent que la majorité des points sont dans la zone de vitesse de 1 m/s. Cependant 11 % des points sont malgré tout en dehors de cette zone. Les relevés des vitesses d'air dans la zone pendant la période de mesure montrent des valeurs très faibles (inférieures à 0,2 m/s en moyenne égale à 0,02 m/s). Les expérimentations ont eu lieu alors que le bâtiment était inoccupé et avec l'ensemble des ouvertures fermées.

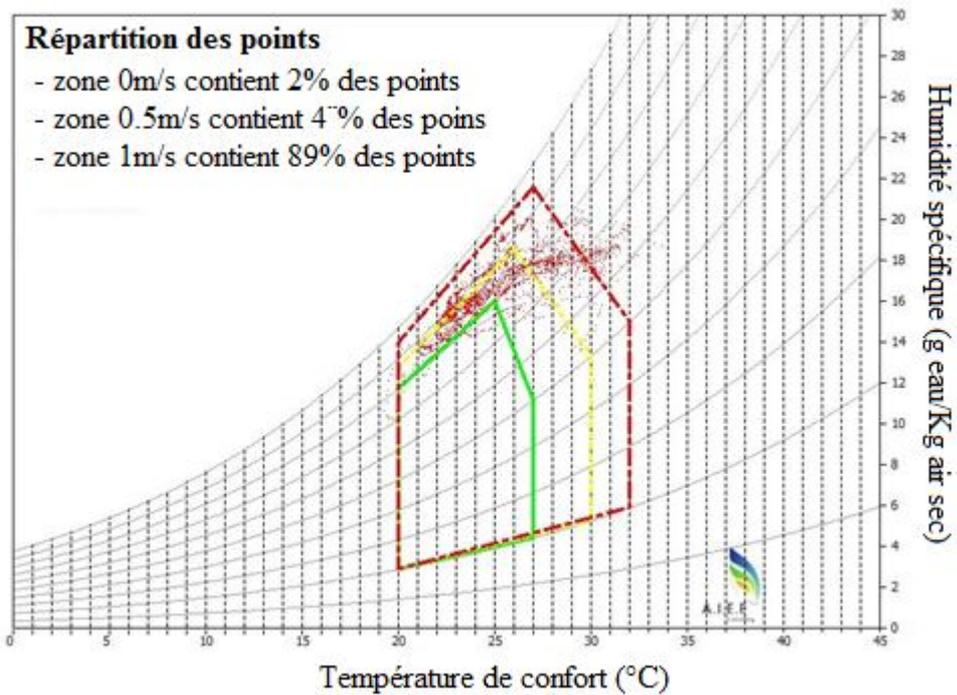


Figure 16 : diagramme de Givoni donnant les couples de température/humidité pendant la période de mesures

La Figure 17 montre que les températures intérieures, air ambiant et de globe noir, sont la plupart du temps supérieures à la température extérieure. Le logement accumule des charges internes et externes et ne les évacue pas même la nuit. Ce qui confirme que la ventilation du logement est insuffisante.

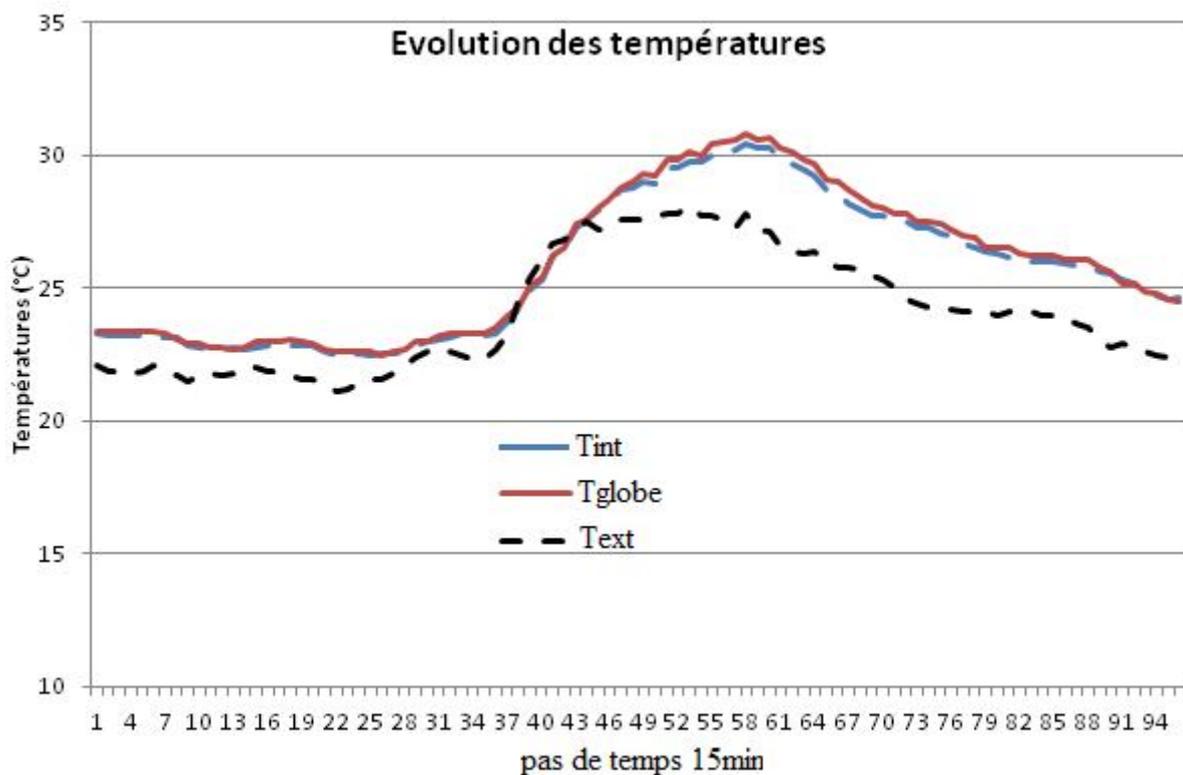


Figure 17 : zoom sur une journée. Evolution des températures (intérieure, extérieure et globe noir)

La température de globe est assez proche de la température ambiante. Les écarts entre ces deux valeurs (Figure 18 et Tableau 6) ne sont pas significatifs car souvent inférieurs à l'incertitude des mesures qui est de l'ordre de 0,5°C. Cela peut être expliqué par deux phénomènes :

- la protection solaire du bâtiment est relativement bonne.
- le bâtiment est peu soumis au rayonnement solaire direct du fait de masques proches (végétation, Figure 15) et lointains (montagnes).

Dans le cas présent, le logement étant situé en fond de vallée et entouré d'arbre à haute tige, c'est l'explication 2 qui doit être privilégiée.

Tableau 6 : écart entre température de globe et température ambiante.

Ecart (température de globe – Température de bulbe sec)	Minimum	maximum	Moyenne
	-2,0	+1,7	1,3

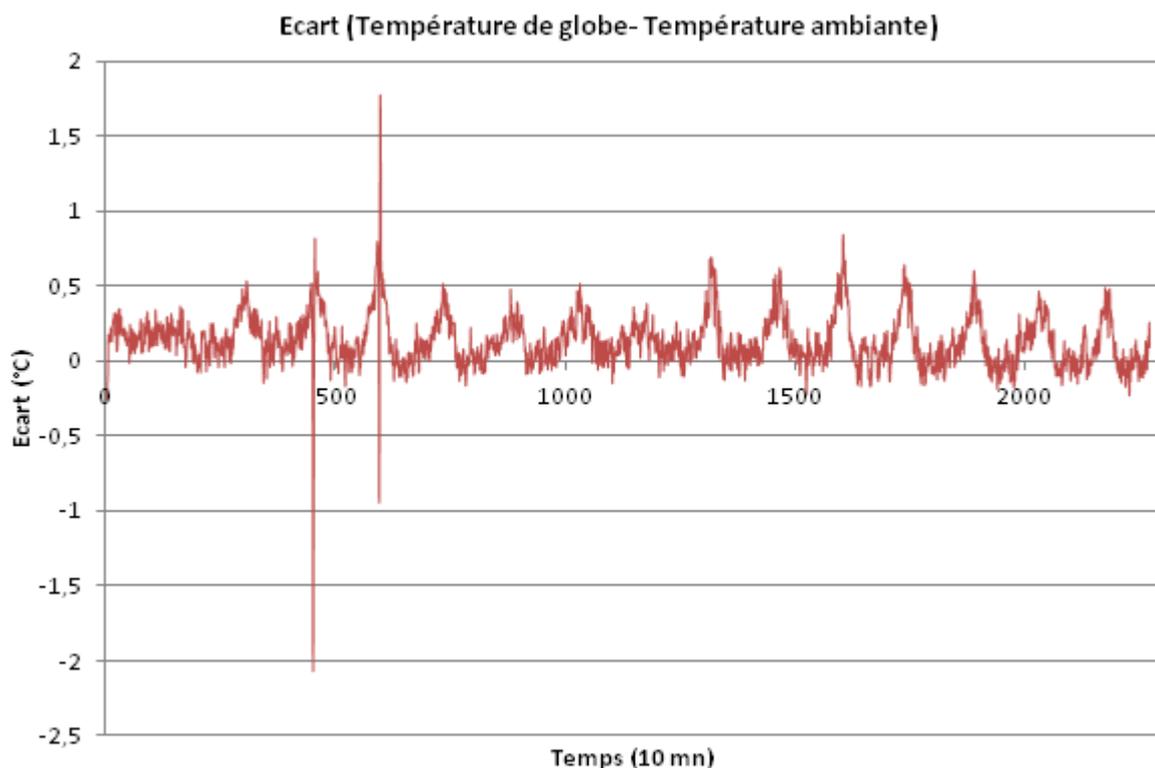


Figure 18 : Evolution de l'écart de température de globe – Température ambiante

L'étude expérimentale montre que les conditions de confort dans le logement sont parfois chaudes et nécessitent une ventilation efficace ainsi qu'un recours à des brasseurs d'air. La protection solaire du toit est difficilement évaluable car :

- Le logement est bien abrité des rayonnements directs par l'environnement (masques proches : végétation)
- Le facteur solaire de la toiture n'est pas calculable car l'isolation utilisée (Paroi mince réfléchissante Durafoil) ne peut être qualifiée par une valeur de conductivité thermique.
- La ventilation du logement ne permet pas l'évacuation des charges thermiques: elle est non traversante pour certaines pièces et la porosité est insuffisante.

6.3. Etude numérique

L'étude numérique a pour objectif de simuler des solutions susceptibles d'atténuer les sources d'inconfort identifiées lors de la phase expérimentale. La protection solaire avec l'isolation de la toiture ainsi que la ventilation seront les principaux leviers sur lesquels nous pourrions agir. En préalable nous donnerons quelques détails sur la modélisation du bâtiment et les hypothèses de description.

L'estimation des performances et les modifications de conception envisagées pour le bâtiment ont été réalisées en utilisant le fichier météorologique annuel type présenté dans la partie 1 en se focalisant sur les périodes extrêmes : la semaine du 3 au 10 février où la température intérieure est la plus chaude.

La description numérique du bâtiment nécessite une représentation 3D de l'habitation sur la base de plans fournis par le constructeur et de relevés sur le terrain (Figure 19). Puis, il est nécessaire de spécifier les caractéristiques thermiques du bâtiment, la situation géographique, les plannings d'occupation, etc., nécessaires pour finaliser la modélisation numérique.

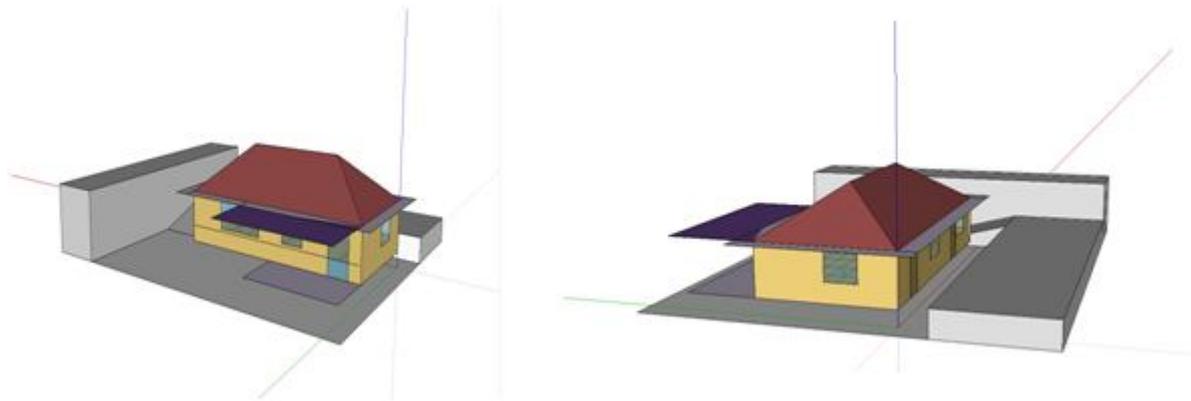


Figure 19 : Représentation 3D du bâtiment

La validation de la description numérique a été obtenue par comparaison des prédictions du modèle de bâtiment et des mesures effectuées lors de la campagne expérimentale. L'objectif est de caler la description numérique afin que l'écart entre la température intérieure mesurée et la température simulée, appelé résidu, soit proche de l'incertitude de mesure. Cette incertitude est généralement évaluée à $0,5^{\circ}\text{C}$ dans le cas d'expérimentations sur cellules « test », lorsque la description du bâtiment est bien connue. Dans le cas du faré OPH, certaines données manquantes (Constitution interne de certaines parois, caractéristiques thermiques des matériaux ayant vieillis, description précise de l'environnement proche et lointain, etc.) affectent la précision du modèle. La valeur acceptable de résidu est fixée à $\pm 1^{\circ}\text{C}$. La procédure de calage des paramètres du bâtiment a donc permis de limiter la valeur absolue du résidu à moins de 1°C .

6.4. Prescriptions d'amélioration

6.4.1. Isolation de la toiture

Les performances de l'isolation actuelle du bâtiment (PMR) n'étant pas établies, nous allons tester plusieurs épaisseurs d'isolants conventionnels. Nous utiliserons un isolant de conductivité thermique de $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et de chaleur massique de $840 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ dont nous ferons varier l'épaisseur. Pour le calcul du facteur solaire, l'absorptivité est supposée égale à 0,6.

Le choix de l'épaisseur d'isolant en toiture doit permettre d'atteindre des valeurs usuelles de facteurs solaires. Les valeurs cibles sont $S=0,03$ et $S=0,02$ correspondant aux exigences imposées respectivement par la RTAADOM et le référentiel PERENE (Tableau 7). La configuration de base correspond au bâtiment actuel que l'on suppose sans isolant conventionnel et pour lequel le facteur solaire est estimé à 0,15.

Tableau 7 : Configuration d'isolation de la toiture

Configuration	Épaisseur isolant (cm)	Facteur solaire toiture
Base	0	0,15
RTAADOM	5	0,03
PERENE	8	0,02

Le graphique de la Figure 20 montre que l'**isolation de la toiture est indispensable** pour limiter la surchauffe du bâtiment. La valeur cible réglementaire du facteur solaire doit être au plus égale à 0,03. On note également sur la Figure 20 qu'une valeur plus faible du facteur solaire à 0,02 ne modifie pas beaucoup la température intérieure, et donc les conditions de confort des bâtiments ventilés naturellement. Par contre, il faut noter, que pour les bâtiments climatisés, un meilleur facteur solaire aura un impact sur la consommation du système de climatisation. Une épaisseur de 8cm apparaît comme la valeur à retenir.

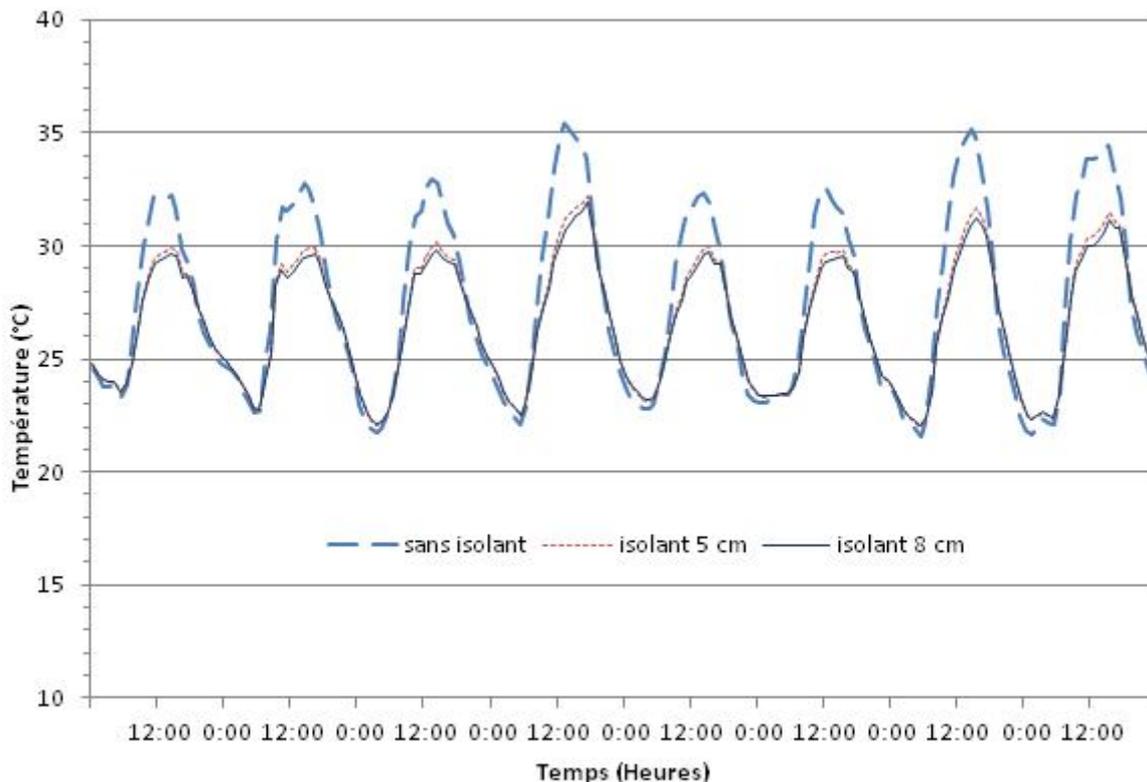


Figure 20 : Evolution des températures intérieures du bâtiment pour les différentes configurations d'isolation de la toiture.

6.4.2. Protection solaire des parois verticales (baies et murs)

Les apports solaires par les parois verticales constituent une charge thermique importante en climat tropical. C'est principalement les apports thermiques par les baies vitrées qu'il est important de contrôler. Les apports par les parois opaques sont généralement plus faibles. La règle de conception à appliquer est d'éviter la pénétration de rayonnement solaire direct à l'intérieur de la zone par des dispositifs adaptés. Le faré OPH dispose dans sa version de base d'une protection solaire des parois verticales de type débord de toiture sur toute sa périphérie (Figure 21) avec une terrasse couverte sur la façade principale. Ce type de protection traite à la fois les parties opaques des parois (murs) et les parties vitrées (baies). Les dimensions de la protection solaire sont données Figure 22.



Figure 21 : protection solaire par débord de toiture sur la périphérie du bâtiment.

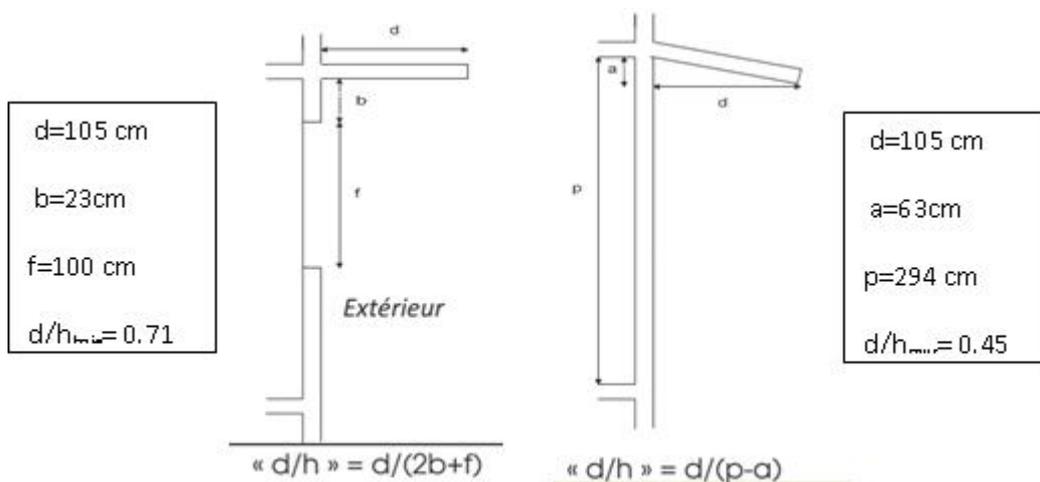


Figure 22 : dimensions de la protection solaire des parois baies (gauche) et des murs (droite)

Le point sensible en termes de conception étant les apports par les baies nous étudierons plus particulièrement ce point. Compte tenu de la dimension du débord, on peut déterminer la hauteur du soleil dans le ciel pour laquelle les baies sont protégées du rayonnement solaire direct. Cette valeur est de 57° (par rapport à l'horizontal). La Figure 23 donne la hauteur angulaire du soleil dans le ciel pour les solstices d'été et d'hiver (21 décembre et 21 juin) ainsi que la hauteur angulaire

correspondant à la protection assurée par le débord. La protection ne permet pas une protection de la surface totale des baies toute l'année.

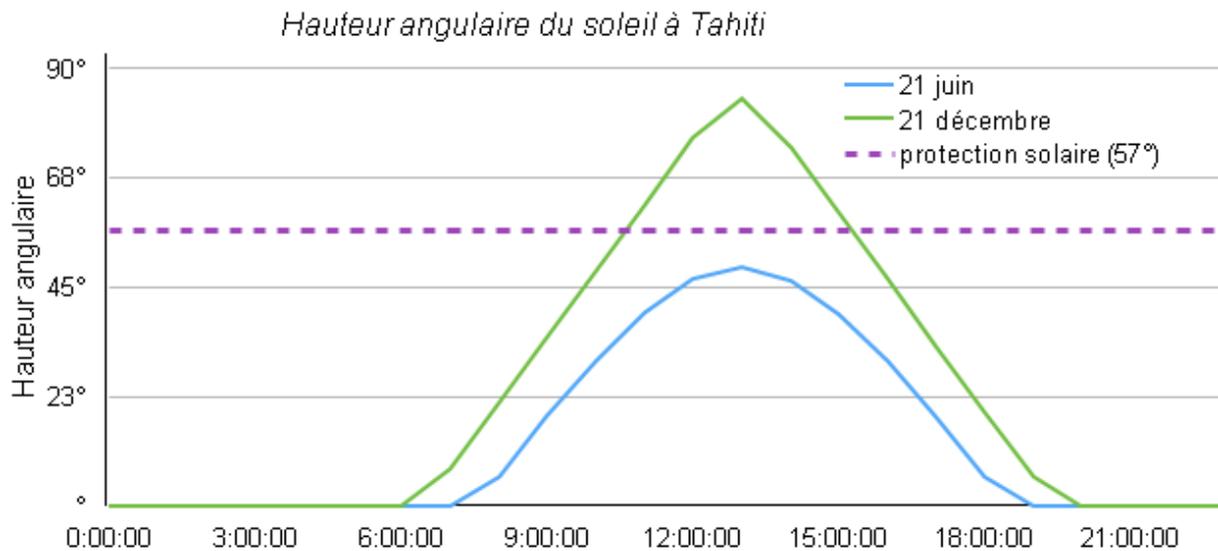


Figure 23 : efficacité des protections solaires des baies

EnergyPlus permet d'évaluer le rayonnement direct (de plus courte longueur d'onde) total reçu sur l'ensemble des surfaces vitrées du bâtiment pour les deux solstices. La Figure 24 montre l'effet de la protection solaire contre l'ensoleillement direct des surfaces vitrées. Comme on pouvait s'y attendre, lorsque le soleil est bas dans le ciel, en hiver austral toute la journée, et le matin et le soir en été austral. On note par exemple que le 21 décembre, alors que la course du soleil passe proche du zénith, la protection solaire est efficace entre 11h00 et 15h00 car l'irradiation est nulle pendant ce créneau. En revanche, le 21 décembre, la protection solaire a moins effet sur le rayonnement solaire direct. Dans ce cas, une partie des vitrages reçoit du rayonnement direct toute la journée.

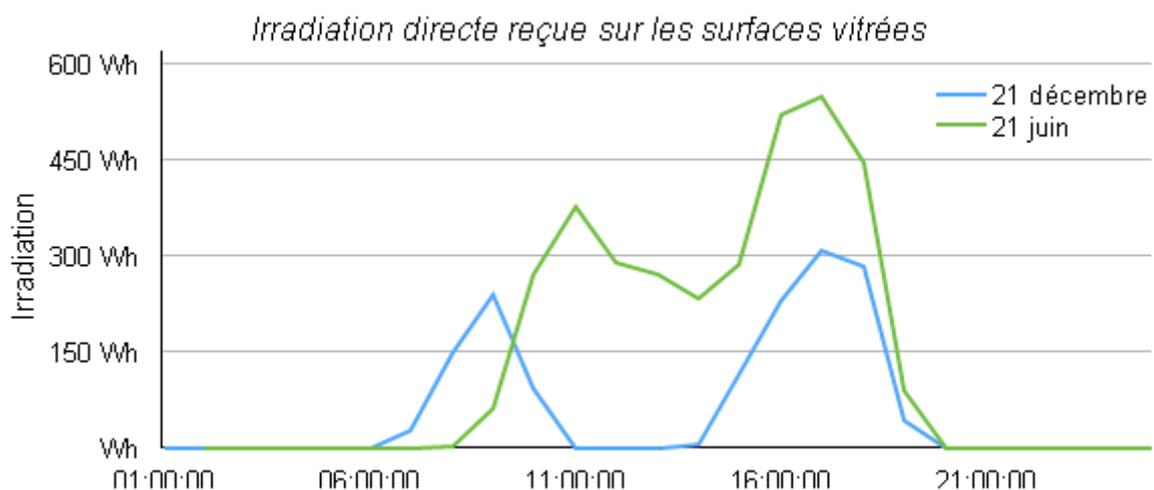


Figure 24 : irradiation directe (courte longueur d'onde) totale des surfaces vitrées

Les protections solaires de type « débord en toiture » ne suffisent donc pas toujours à limiter les apports énergétiques solaires à travers les baies vitrées. Les simulations suivantes présentent une solution de protection solaire par brise-soleil à lames orientables positionnées au-dessus de chaque baie suivant le schéma proposé (Figure 25). Seules les façades Est, Ouest et Nord ont été ainsi équipées car la façade Sud est suffisamment protégée par le débord de toiture.



Figure 25 : représentation schématique des brises soleil constitués de 3 lames orientables de largeur 30 cm inclinées ici à 30° par rapport à la verticale.

Le rôle des brise-soleils de type lattes mobiles est de bloquer le rayonnement solaire direct pour les périodes de la journée lorsque celui-ci est assez bas et où le débord de toiture est inefficace. Dans ce cas, ce sont les façades exposées à l'Est et à l'Ouest qui sont les plus critiques puisque la hauteur du soleil y est la plus basse en début et fin de journée. La meilleure inclinaison des lattes du brise-soleil sera recherchée en diminuant l'irradiation directe atteignant la baie. Les simulations sont réalisées pour la journée du 21 juin et avec des inclinaisons par rapport à la verticale de 15°, 30°, 40° et 60° (Figure 26). Une inclinaison comprise entre 30° et 45° du brise-soleil est efficace pour bloquer le rayonnement solaire direct. Pour des inclinaisons plus faibles, notamment 15°, la protection de la baie est meilleure mais au risque de diminuer fortement l'éclairage naturelle dans le bâtiment. La valeur de 30° sera retenue.

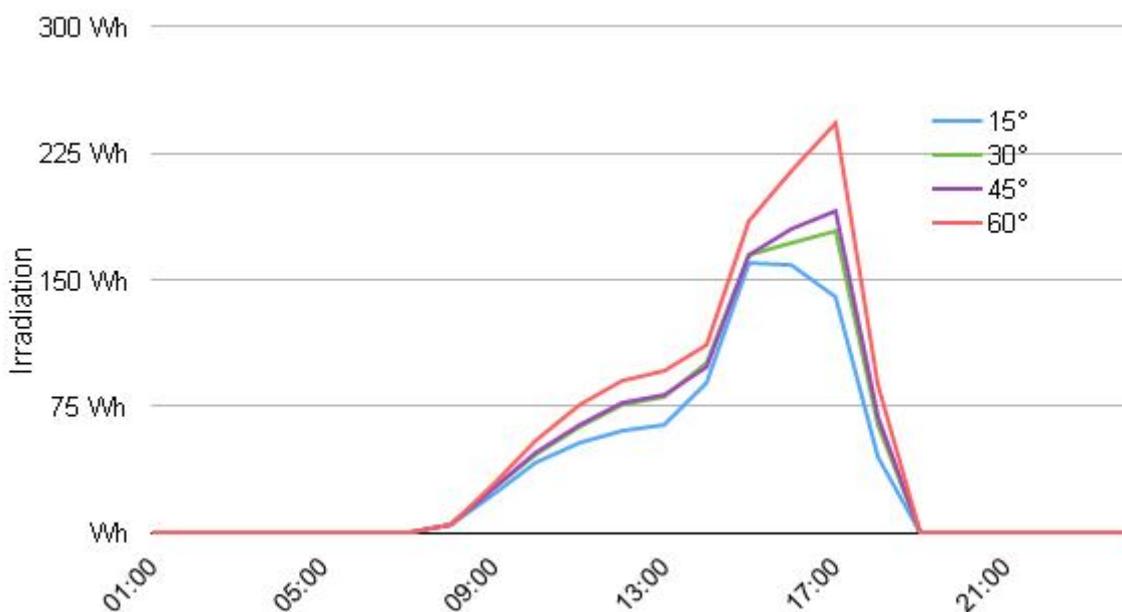


Figure 26 : Irradiation sur la surface vitrée exposée Ouest suivant l'inclinaison du brise-soleil

En généralisant la protection solaire à l'ensemble des baies du bâtiment, les apports solaires par les vitrages sont sensiblement diminués. Sans protection solaire, les apports énergétiques solaires sont compris entre 100kWh et 200kWh. En ajoutant des brise-soleils, en plus du débord en toiture déjà existant, ils diminuent de plus de 300 kWh par an (Figure 27 et Tableau 8).

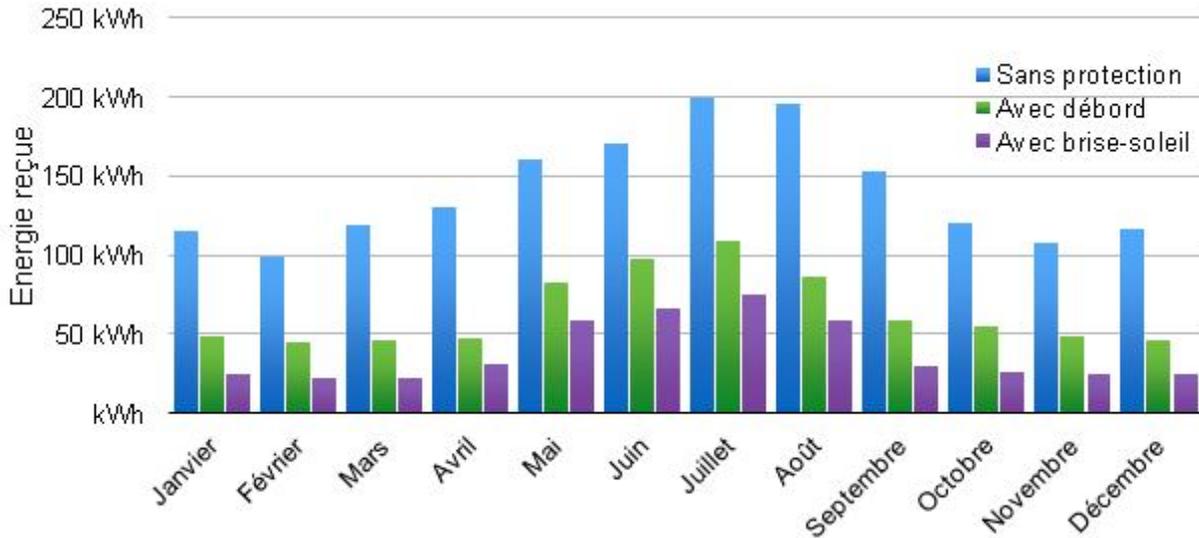


Figure 27 : apports énergétiques mensuels sur les surfaces vitrées

Tableau 8 : apports solaires annuels en fonction des protections solaires

	Sans protection	Débord de toiture	Débord + brise soleil
Apports solaires par les baies (kWh)	1687	772	466

6.4.3. Ventilation du bâtiment

Actuellement nos simulations ont été réalisées sans ventilation. Grâce à EnergyPlus, nous pouvons simuler une ventilation à l'intérieur du bâtiment. Jouer sur la ventilation du bâtiment permet d'améliorer le confort intérieur en agissant :

- sur la température, en évacuant les charges thermiques,
- sur l'humidité relative, en évacuant les charges latentes
- sur la sensation de confort, en assurant une certaine vitesse d'air sur les usagers.

La ventilation du bâtiment est étudiée en faisant varier un débit fixe d'air traversant la zone. On estime qu'un taux de renouvellement d'air de 5 à 10 volumes par heure du bâtiment est suffisant pour assurer une bonne ventilation du bâtiment [Courgey 2006]. Le volume d'air qui doit être renouvelé dans le bâtiment est de 280 m³. Le bâtiment sera simulé avec un débit de ventilation fixe de 1400 et 2800 m³/h correspondant respectivement à 5 et 10vol/h et comparé au bâtiment de base (sans ventilation).

La Figure 28 montre que la température intérieure diminue de façon significative avec une ventilation de 5 et 10vol/h. Les valeurs maximale et minimale de la température intérieure journalière du bâtiment diminuent de 2°C entre le bâtiment de base et le bâtiment ventilé à 10 vol/h. Cependant on remarque qu'une augmentation de la ventilation de 5 vol/h à 10vol/h n'apporte pas d'amélioration significative. Dans les deux cas la température intérieure est proche de la température extérieure. Il apparaît donc qu'un renouvellement d'air équivalent à 5 vol/h est suffisant pour ventiler le bâtiment.

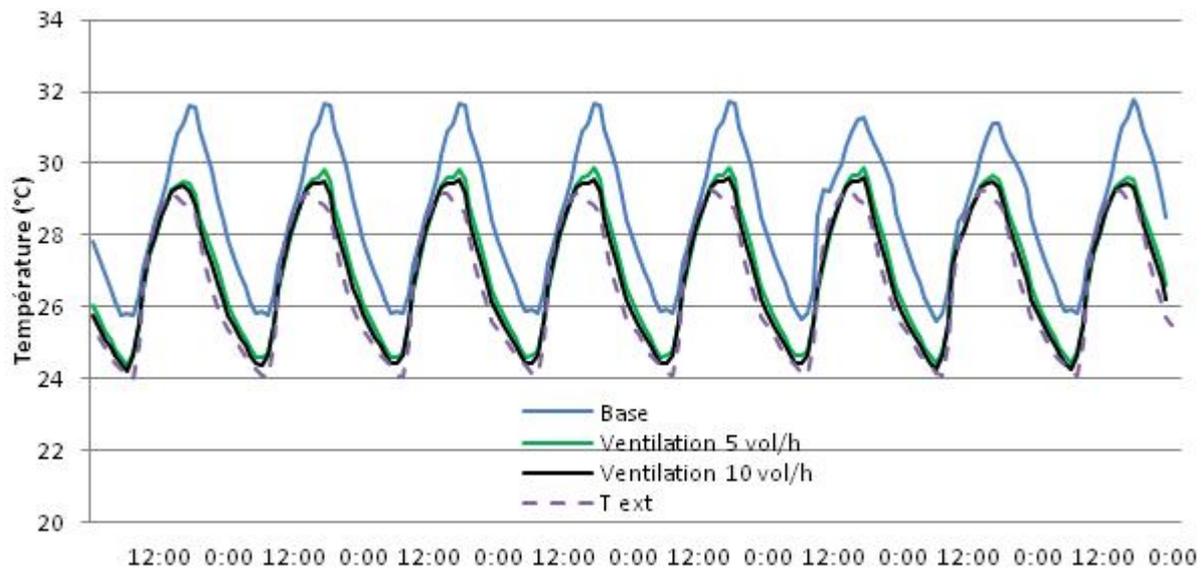


Figure 28 : impact de la ventilation sur la température intérieure (avec isolation en toiture)

6.5. Synthèses des prescriptions

La performance finale du bâtiment est présentée à la Figure 29 donnant l'évolution du bâtiment brut avant modification comparé au bâtiment « amélioré » en supposant les modifications de conception suivantes :

- Isolation de la toiture par 8 cm d'isolant conventionnel ($\lambda=0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)
- Ventilation correspondant à 5 vol/h
- Protection solaire par brise-soleils inclinés à 30°

L'amélioration de la température intérieure entre le bâtiment brut et le bâtiment amélioré est sensible. Cependant, les conditions intérieures sont très proches des conditions extérieures signifiant que la conception de l'enveloppe et la ventilation du bâtiment sont relativement satisfaisantes. Néanmoins, la température intérieure reste élevée en journée pendant la période chaude avec des valeurs dépassant les 30°C. Pour remédier à l'inconfort pendant ces périodes, il faut intégrer une variable supplémentaire : la vitesse d'air sur l'utilisateur. On sait qu'une vitesse d'air d'1m/s permet de diminuer la température ressentie d'environ 4°C.

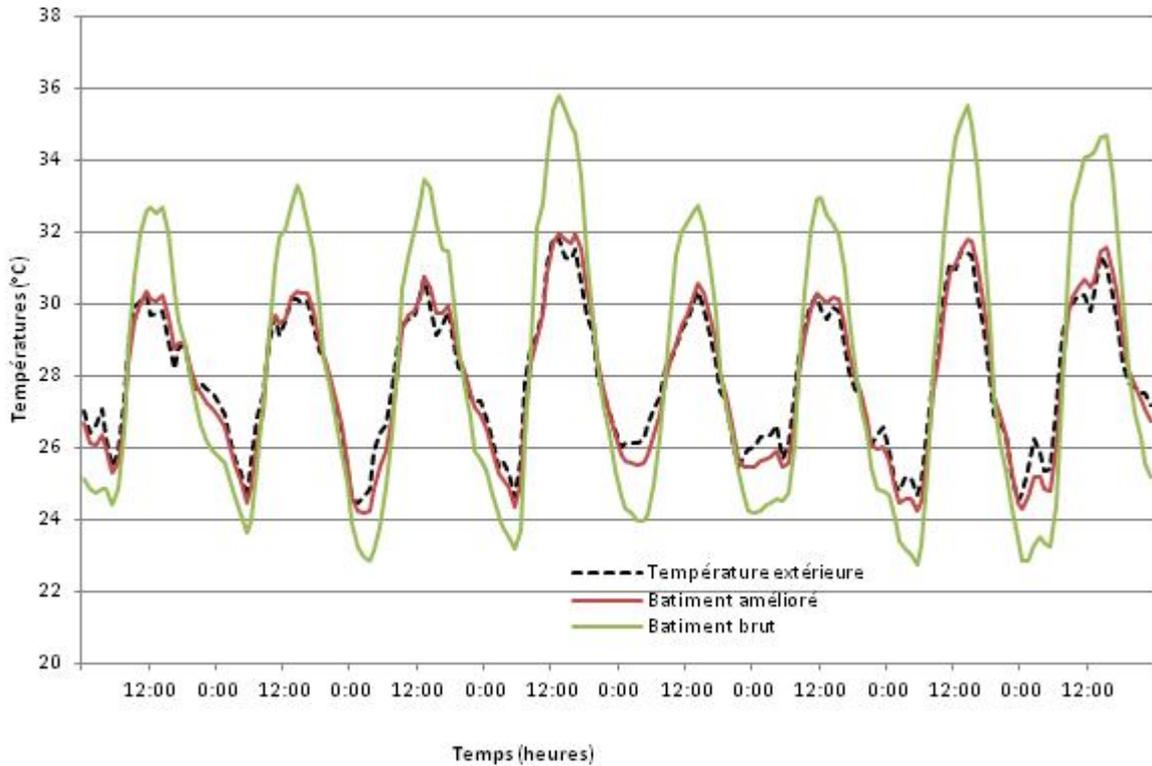


Figure 29 : évolution la température pour le bâtiment amélioré.

En traçant le nouveau diagramme psychométrique prenant en compte nos modifications, isolation dans les murs et brise-soleil ventilation du bâtiment, on s’aperçoit que nous avons amélioré le confort intérieur. La Figure 30 compare les deux diagrammes, avec et sans modifications et montre que tous les points peuvent être concentrés dans la zone de confort correspondant à une circulation d’air de 1m/s. A ce stade de l’étude, il nous est difficile de corrélérer rigoureusement la vitesse de déplacement d’air et une ventilation entrainant un remplacement de 5 volumes d’air par heure comme nous l’avons préconisé. Un des objectifs du travail de thèse qui débute à la suite de ce programme sera de modéliser la circulation d’air dans un bâtiment pour établir cette relation.

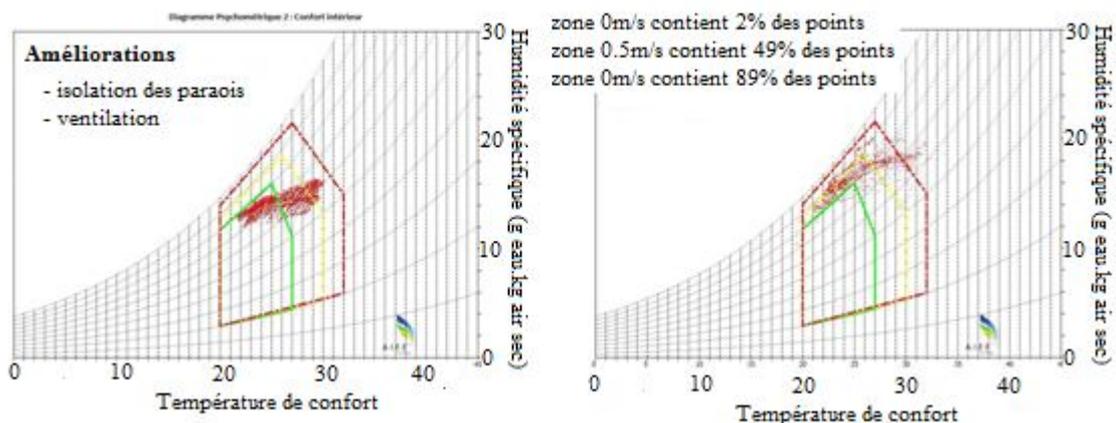


Figure 30 : diagramme de Givoni, pour le bâtiment modifié (gauche) et de base (droite)

7. ETUDE DE LA TYPOLOGIE « ECOLE »

7.1. Description des types de bâtiment

Les plans de conception des écoles en Polynésie française sont globalement identiques : des blocs de bâtiment allongés comportant plusieurs classes alignées. Dans cette étude, deux types d'écoles ont été étudiées :

- Des écoles de construction ancienne : 2 à Moorea (Papetoai et Haapiti) et une à Tahiti (école Rua'tama à Faa'a)
- Une école de conception récente : école de Te'avaro à Moorea

Pour chacune de ces écoles, des campagnes expérimentales et des analyses numériques ont été menées. Ce rapport présente, ci-après, la synthèse des enseignements tirés des expérimentations réalisées sur les écoles anciennes et récentes ainsi que les principales analyses réalisées à l'aide de simulations numériques.

7.1.1. Exemple d'école de conception ancienne : Ecole de Papetoai

Ces écoles sont généralement des bâtiments rectangulaires de pleins pieds où les salles de classe s'enchaînent sur la longueur du bâtiment (Figure 31). De ce fait, les salles respectent bien le principe de la ventilation traversante avec de plus une bonne porosité des façades. Cependant l'utilisation de rideaux destinés à diminuer la luminosité réduit significativement la porosité réelle. Les bâtiments sont souvent en mauvais état avec des dégradations parfois importantes des parois et des équipements. Pour les écoles étudiées, il n'existe que peu de documents de description des ouvrages.



Figure 31 : école de conception ancienne (Papetoai)

7.1.2. Exemple d'école de conception récente : école de Te'avaro (Moorea)

Les écoles de conception plus récente telle que celle de Te'avaro sont construites sur plusieurs niveaux et intègrent déjà des prescriptions en matière de conception adaptée au climat (Figure 32). Comme les écoles anciennes, les écoles récentes sont traversantes et avec une porosité importante.

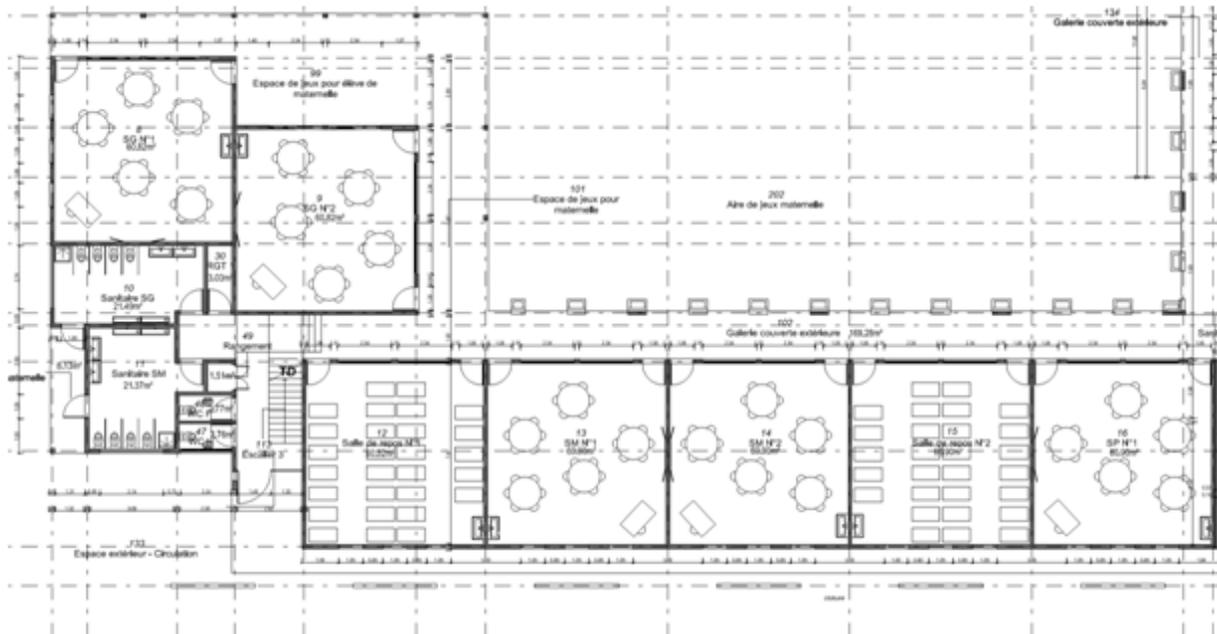


Figure 32 : disposition des salles de classe (école Te'avaro).

Cependant, comme pour les écoles anciennes, la porosité est souvent très limitée par l'ajout de rideaux intérieurs, installés par les enseignants pour diminuer la luminosité (Figure 33).



Figure 33 : intérieur d'une salle de classe récente

7.2. Etude expérimentale de la typologie « Ecole »

Les résultats expérimentaux présentés ci-après, pour le cas des écoles récentes et anciennes, sont destinés à mettre l'accent sur des problématiques particulières, caractéristiques du comportement thermique de ces bâtiments. C'est dans ce but que les mesures ne sont pas présentées dans leur intégralité. Les séquences expérimentales ont été choisies en fonction des phénomènes illustrés.

7.2.1. Mise en évidence des problématiques des écoles de conception ancienne

Les [Figure 34](#) et [Figure 35](#) suivantes illustrent les conditions intérieures particulières relevées dans les écoles de conception ancienne et plus particulièrement mettent en évidence les points suivants :

- Les **températures** relevées en janvier sont élevées pendant les heures d'école avec des valeurs maximales atteignant 34°C pour une **humidité relative** qui reste aussi élevée en journée (60% en milieu de journée) ([Figure 34](#)).
- Les **vitesse d'air** intérieures sont faibles et généralement inférieures à 0,6 m/s alors que le potentiel de ventilation est bon puisque les données météo relèvent des vitesses de vents jusqu'à 3,5m/s. Ceci laisse supposer que le potentiel de ventilation n'est pas exploité et que la gestion des ouvertures par les usagers n'est pas optimale ([Figure 35](#) et [Figure 36](#)).
- La **luminosité** est aussi globalement faible (entre 150 et 200 vers midi) et en dessous des niveaux requis pour les salles de classe (400 lux), alors que le rayonnement solaire est fort ([Figure 37](#)).
- Les **conditions de confort** sont globalement insatisfaisantes car les températures sont relativement élevées, particulièrement en période chaude ([Figure 38](#)).

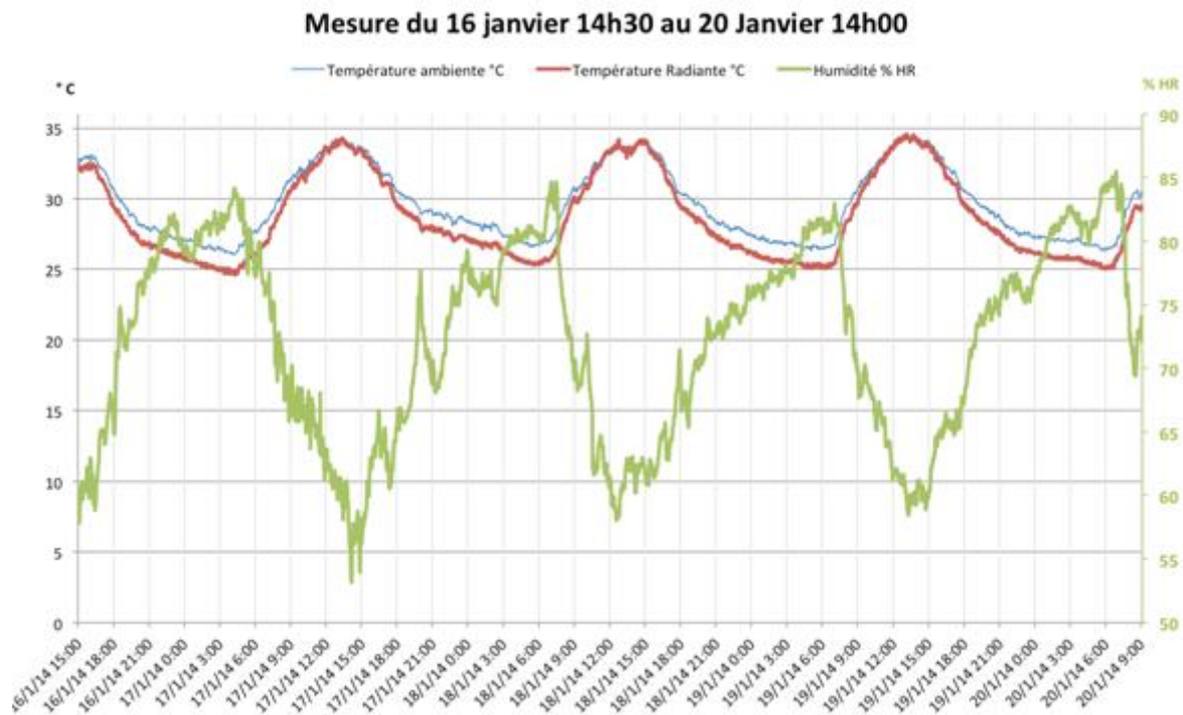


Figure 34: évolution des températures et de l'humidité de la classe sur la période

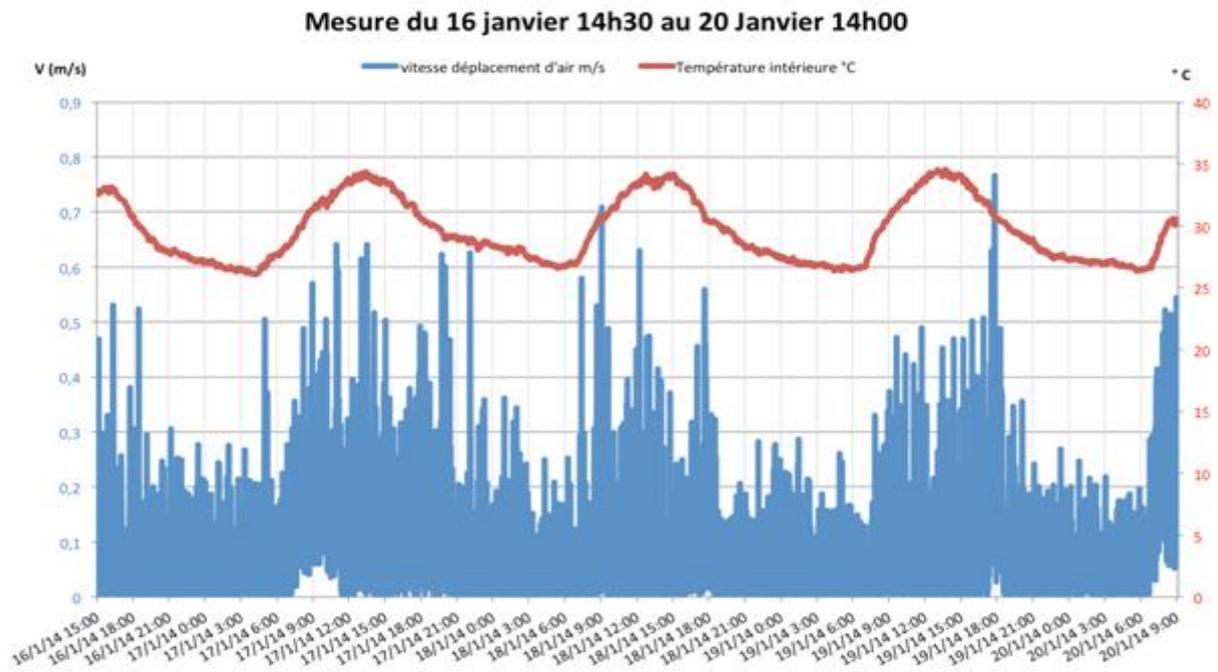


Figure 35 : vitesse d'air à l'intérieur de la classe sur la période

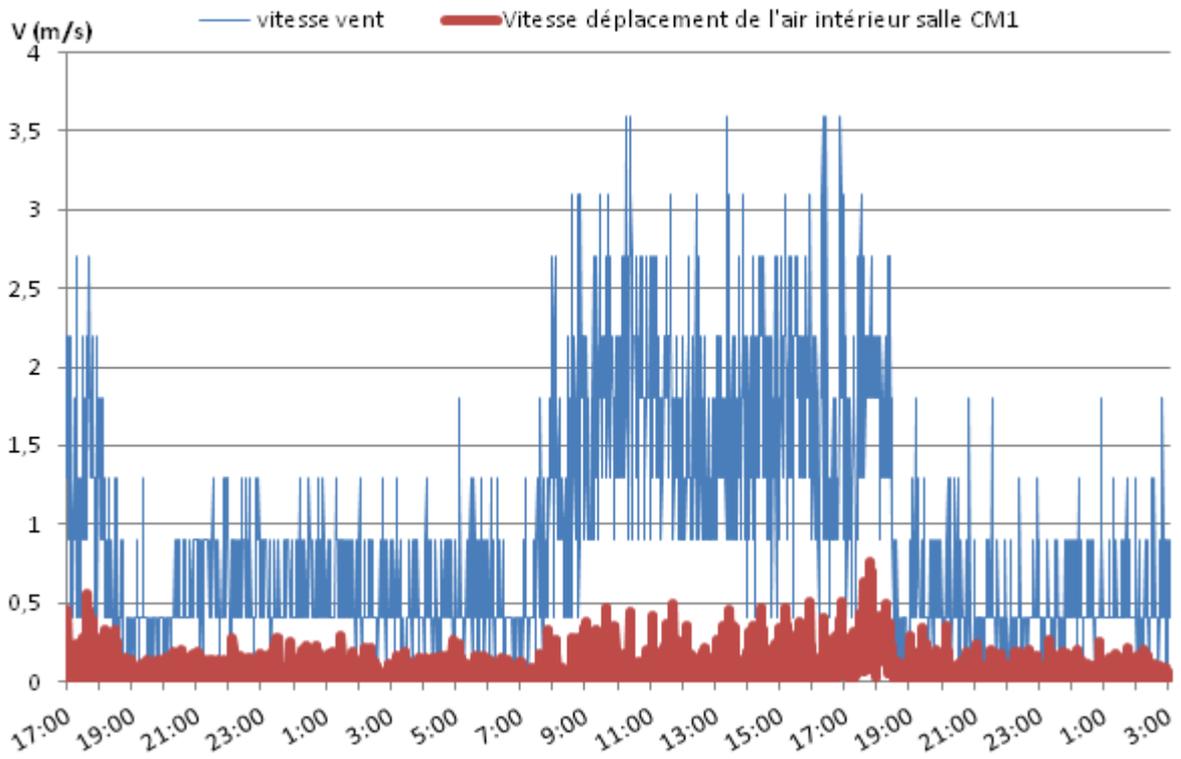


Figure 36 : comparaison vent et vitesse d'air intérieure

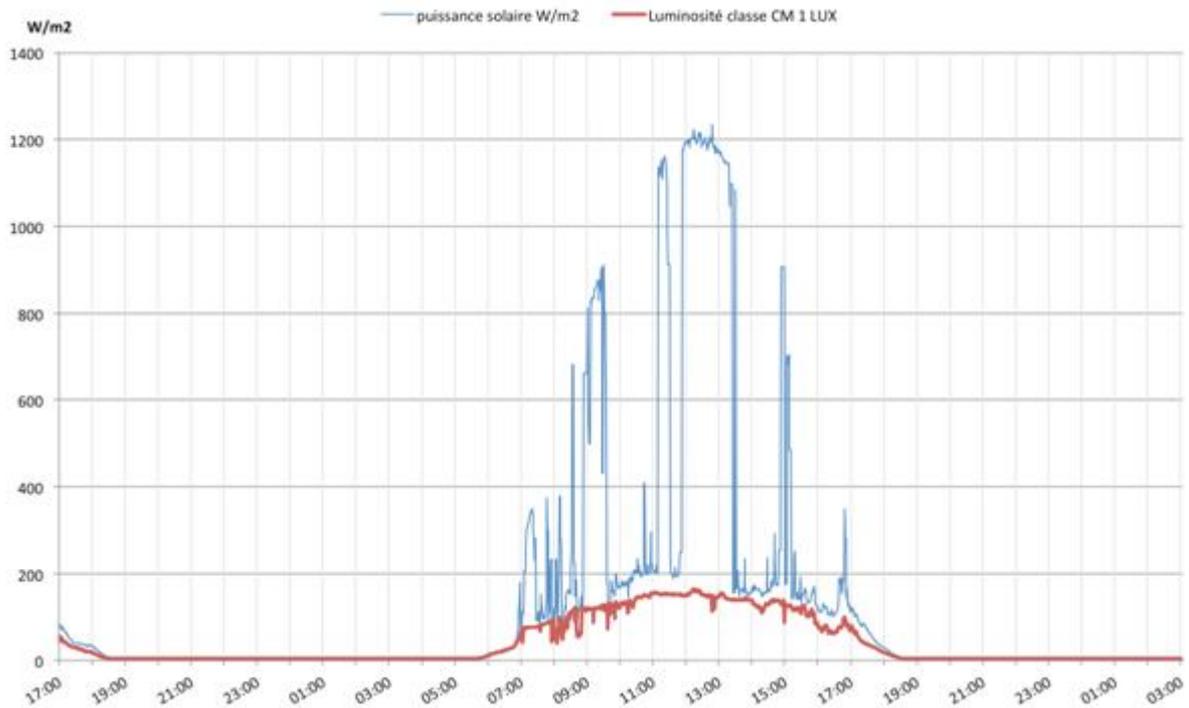


Figure 37 : luminosité de la classe sur la période et du rayonnement solaire (en rouge, exprimée en Lux, en bleu, exprimée en W/ m²)

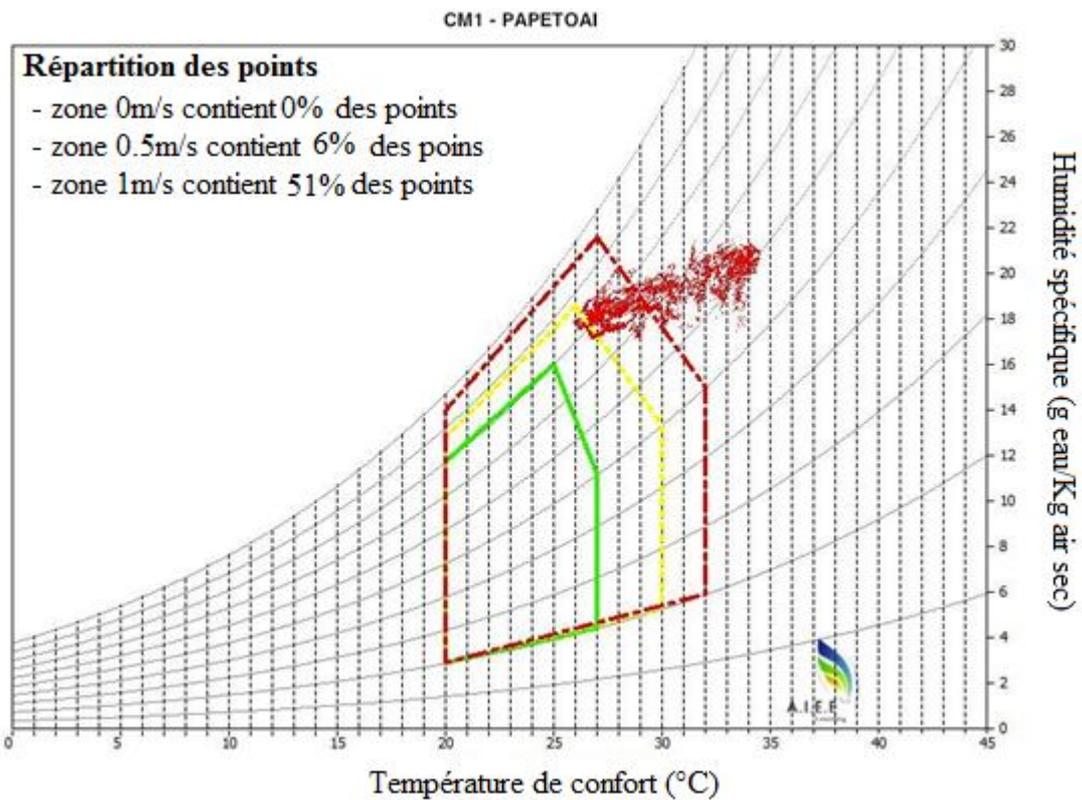


Figure 38 : Diagramme de confort de Givoni pour une salle de classe de conception ancienne en période chaude

7.2.2. Mise en évidence des problématiques des écoles de conception récentes

Confort hygrothermique

Le diagramme de confort de la [Figure 39](#) présente la salle de classe étudiée comme hygrothermiquement inconfortable. Les niveaux de température atteints sont importants et ne permettent pas d'obtenir des conditions de confort satisfaisantes avec des vitesses d'air inférieures à 1 m/s. Il est nécessaire d'avoir des vitesses d'air supérieures à 1 m/s pendant 44% du temps.

Or sur le graphe suivant ([Figure 40](#)), les mesures de vitesses de déplacement de l'air mesurées dans la salle montrent que celles-ci ne dépassent guère 0,5 m/s.

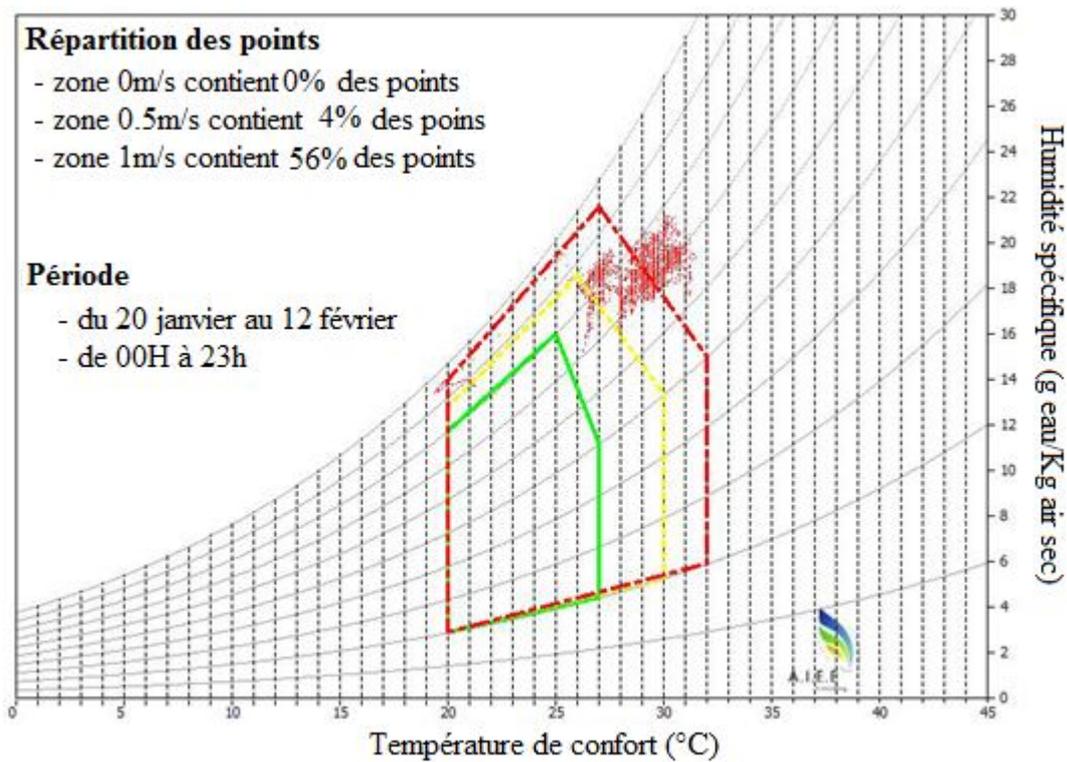


Figure 39 : Diagramme de confort pour le cas des écoles de conception récentes

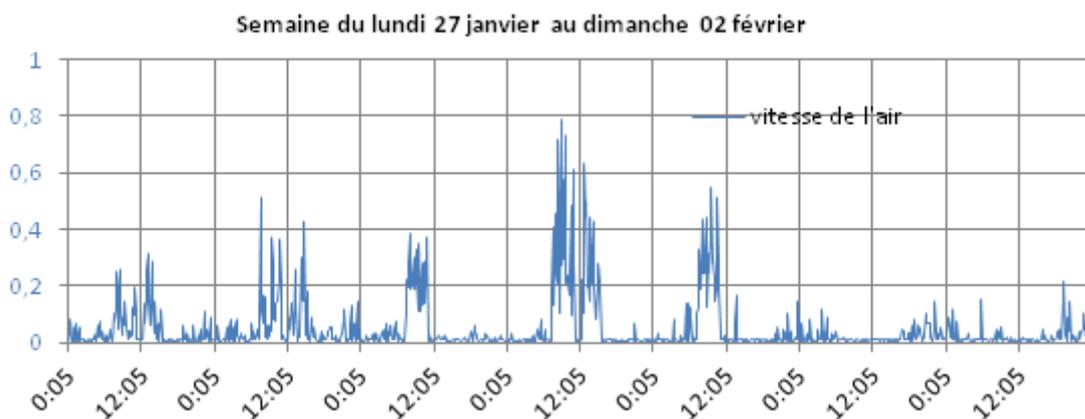


Figure 40 : Vitesse de déplacement de l'air (m/s)

L'analyse des vents de la [Figure 41](#) permet d'observer l'exposition du bâtiment et de ses ouvrants aux vents extérieurs, mais aussi d'observer s'il existe un potentiel de ventilation naturelle le site. D'une manière générale, les vents proviennent du Sud ou du Nord-Nord-Est. Ces vents suivent la côte et sont issus de la déviation des vents synoptiques due au relief de l'île.

Sur la période d'observation (été austral) le régime d'alizée d'Est à Sud-Est n'a pas été observé. Ce qui se traduit par un potentiel de ventilation limité.

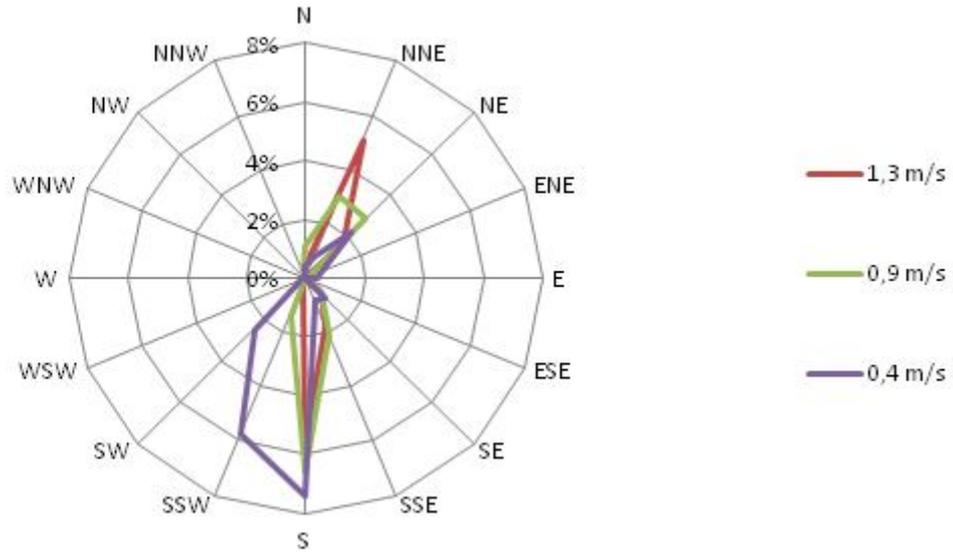


Figure 41: Analyse des vents

Le **Tableau 9** classe l'occurrence des directions indépendamment des vitesses et l'occurrence des vitesses indépendamment de leur direction. Le tableau de du haut (**Tableau 9**) nous donne l'occurrence des directions du vent. On constate par exemple que le vent vient du Sud environ 29.1% du temps et environ 20% du NE/NNE. Le tableau du bas (**Tableau 9**) indique que 28% du temps, il n'y a pas de vent, ou encore sa vitesse est inférieure à 0,4 m/s. L'emplacement géographique du site (côte Est en bord de mer) laisse supposer que l'exposition au vent doit être suffisante. Elle l'est sans doute en période d'hiver austral où le régime d'Est est majoritaire, mais les mesures ayant été volontairement faites en période chaude, elles montrent que dans ce cas le vent est souvent faible. L'obtention de conditions de confort acceptables en ne recourant qu'à la ventilation naturelle et sans brasseurs d'air paraît difficile.

Tableau 9: Occurrences des directions (haut) et des vitesses de vent (bas)

Direction du vent (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
Occurrence	1,9%	9,3%	10,5%	0,7%	0,8%	0,0%	2,3%	6,4%	29,1%	7,7%	2,5%	0,3%	0,1%	0,0%	0,0%	0,3%

Vitesse du vent (m/s)	0	0,4	0,9	1,3	1,8	2,2	2,7	3,1
Occurrence	28,0%	22,2%	18,5%	15,7%	5,3%	4,9%	3,4%	1,9%

Apports thermiques

La **Figure 42** montre l'évolution de la luminosité et de la température. Elle illustre un pic de température le matin, corrélé à un pic de luminosité. On identifie que, le matin, le rayonnement solaire direct pénètre dans la zone par les baies de la façade Est et vient réchauffer brutalement l'intérieur de la salle. Ce rayonnement solaire constitue un apport thermique important difficile à évacuer au cours de la journée.

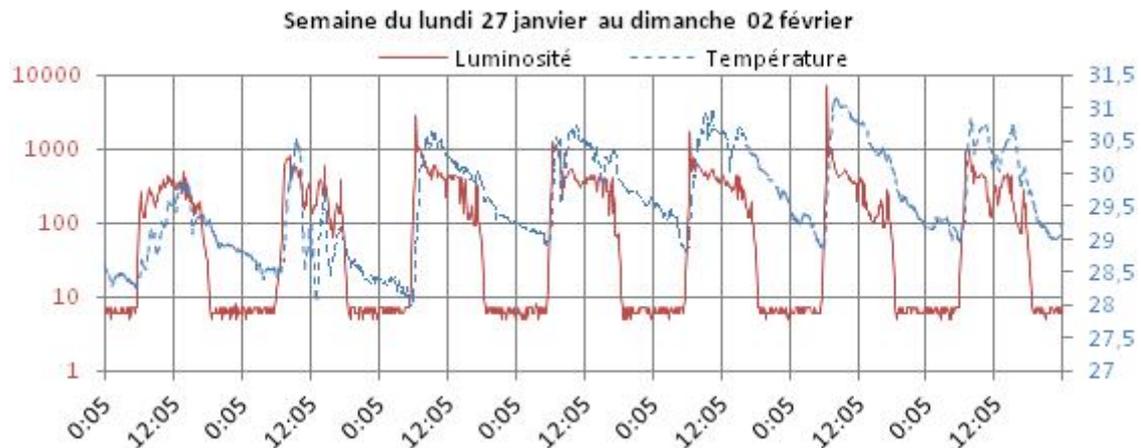


Figure 42 : Température et luminosité

Le [Figure 42](#) met donc assez clairement en évidence l'influence de la corrélation luminosité/température en début de journée où les plus grands pics de luminosité sont atteints à 06h35. On remarque aussi qu'un second pic de luminosité, moins élevé que le matin, est récurrent en fin de journée aux alentours de 17h. Ces pics de luminosité traduisent la pénétration de rayonnement solaire direct dans la salle tôt le matin et tard le soir par les façades Est et Ouest. Les pics du matin s'observent très régulièrement car le ciel est généralement plus clair à ce moment. Les pics du soir sont moins fréquents car la façade Ouest est orientée vers la montagne qui constitue un masque lointain et qui a tendance à s'ennuager en cours des après-midis.

Ces phénomènes s'expliquent donc par l'orientation de l'école dont les façades sont pleinement exposées au soleil levant et couchant comme présenté sur la [Figure 43](#).

L'analyse de ces mesures montre que le matin et le soir des charges thermiques externes importantes pénètrent dans la zone. Ces charges sont par la suite difficiles à évacuer et maintiennent des conditions chaudes pendant les périodes d'occupation.



Figure 43 : course du soleil le 01 février 2014

Il est possible de simuler les ombres sur le bâtiment en début et fin de journées pour illustrer ces commentaires. Ces simulations sont présentées sur les [Figure 45](#) et [Figure 46](#) dans le but d'imager l'exposition des parois à l'irradiation thermique solaire.



Figure 44 : Ombres portées sur la façade EST à 06h00 à gauche et 9h30 à droite le 1er février

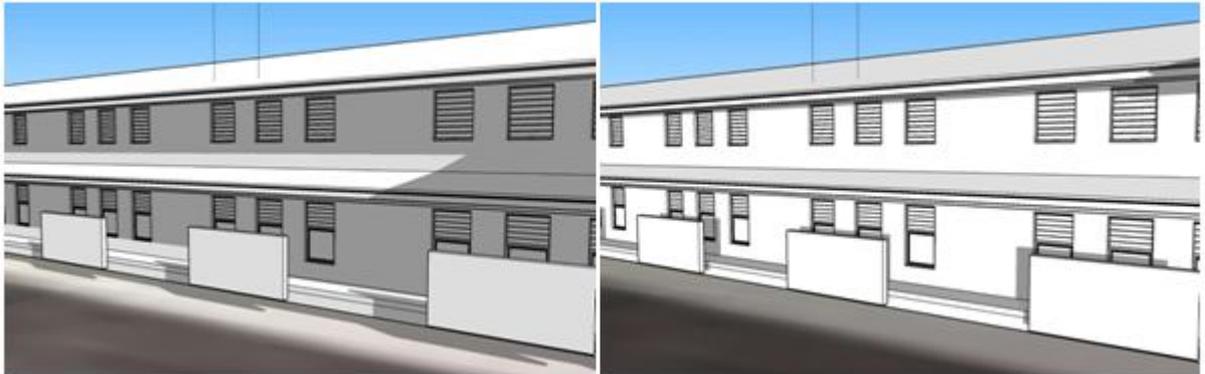


Figure 45 : Ombres portées sur la façade Ouest à 13h45 à gauche et 16h45 à droite le 1er février

La visualisation de l'ensoleillement des façades Est et Ouest montre clairement que le matin et le soir les façades et les baies de ces façades reçoivent un rayonnement solaire direct générant de fortes charges thermiques externes. Par exemple, bien qu'à 16h45, les élèves de l'école aient d'ores et déjà quitté l'établissement, le bâtiment continue d'emmagasiner l'énergie thermique apportée par le rayonnement solaire, et l'on observe sur la Figure 42 que la variation de température à l'intérieur du bâtiment pendant la nuit n'est que de l'ordre de 1,5°C.

Usages du bâtiment

Les données enregistrées par la station météo permettent de comparer les variations de températures internes et externes du bâtiment (Figure 46).

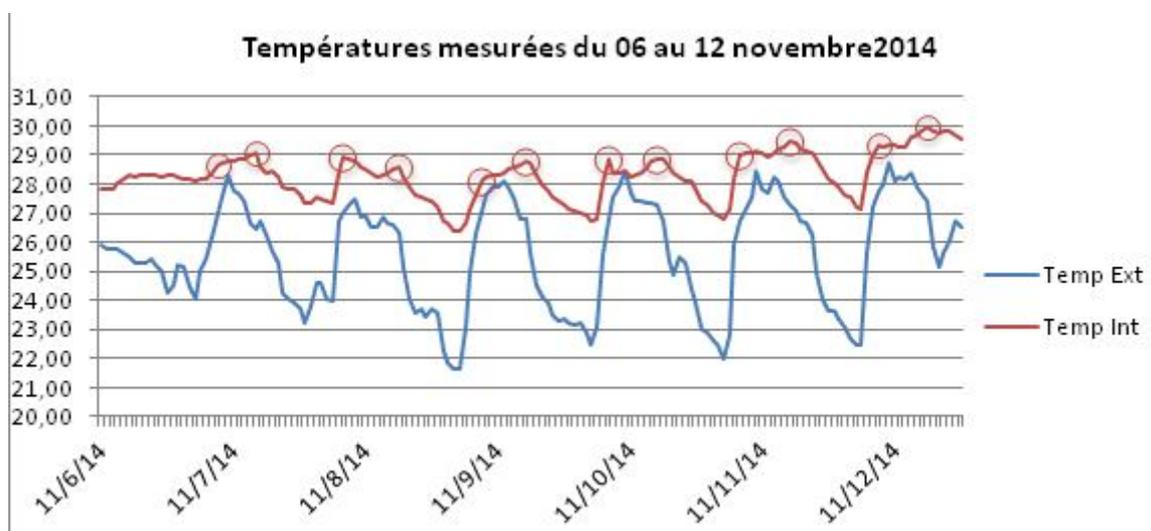


Figure 46 : Température extérieures et intérieures mesurées

Comme noté précédemment, on observe deux pics de température se produisant en début et fin de journée. De plus, il apparaît que la température intérieure ne baisse pas suffisamment pendant la nuit. Il existe donc un potentiel de rafraîchissement nocturne qui n'est pas exploité dans le bâtiment. Il s'est avéré que ce potentiel n'est pas exploité pour des raisons d'usage.

Au regard du comportement du bâtiment, nous avons étudié l'aspect de son utilisation auprès de la directrice. Il en est ressorti que toutes les fenêtres étaient fermées durant la nuit car des spirales anti-moustiques étaient allumées afin de lutter contre l'épidémie de Chikungunya. La fermeture des fenêtres empêchant la ventilation naturelle du bâtiment et par conséquent l'évacuation des charges emmagasinées en journée (notamment celles dues à l'ensoleillement direct en fin de journée).

7.3. Etudes par simulation numérique des bâtiments

Les problématiques et pathologies sont bien évidemment assez différentes suivant la conception ancienne ou récente des écoles. Les écoles anciennes montrent des défauts de conception et sont très peu confortables. Les modifications apportées par les usagers ne sont pas toujours pertinentes et cohérentes en matière de confort (amélioration du confort visuel au détriment du confort thermique). Sur les écoles de conception récente les conditions de confort sont nettement meilleures mais il reste des points d'amélioration possibles notamment sur le dimensionnement des protections solaires qui manquent d'efficacité à certaines heures de la journée. Les simulations numériques étudieront les solutions techniques permettant d'atténuer les pathologies identifiées.

Comme pour l'étude du Faré, l'étude numérique présentée est réalisée avec le code de calcul ENERGYPLUS et son interface graphique « sketchup ».

7.3.1. Modélisation des bâtiments

Ecole de conception ancienne

Les écoles récentes et anciennes ont été représentées sous l'interface Sketchup (Figure 47). Pour les écoles anciennes, l'étude a porté sur l'exemple de Papetoai qui se compose de quatre bâtiments A, B, C et D. Nous présenterons ci-après les analyses pour une classe du bâtiment D.

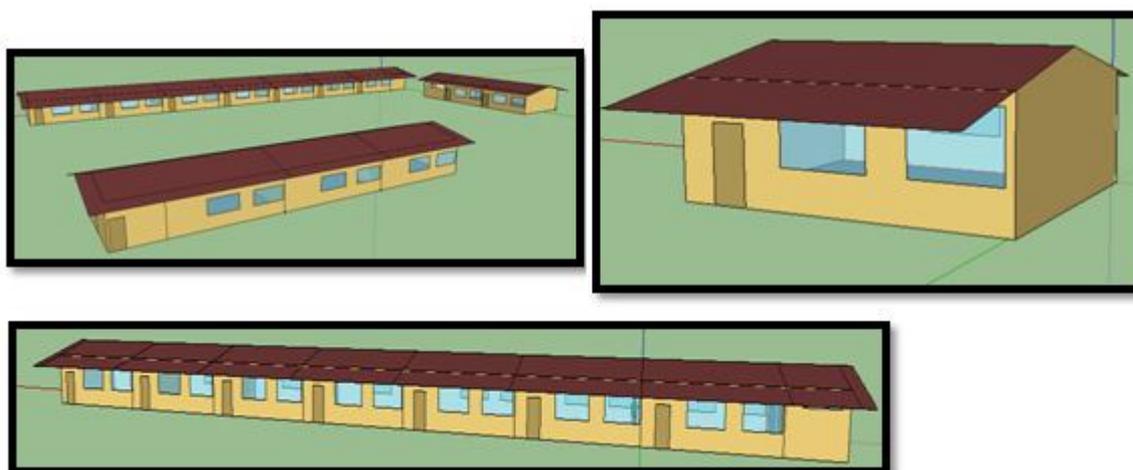


Figure 47 : modélisation des bâtiments et d'une classe type pour les écoles de conception ancienne (exemple Papetoai)

Le Tableau 10 résume quelques caractéristiques de ce type de bâtiment.

Tableau 10 : quelques caractéristiques d'un bâtiment de conception ancienne

Fenêtres	Jalousie vitrage simple 3mm
Portes	Bois isoplane 4 cm
Dalle	Béton coulé sur place 16 cm
Parois verticales	Béton banché 16 cm
Luminaires	4 x 60w encastrés
Parois verticales	Bac acier couleur moyenne 0.75mm
Isolant sous-toiture	Laine de verre 15 mm
Occupations	20 personnes par salle

Le planning d'ouverture de l'école est bien entendu un paramètre important pour l'interprétation des résultats. Il se traduit par les horaires et les périodes des vacances scolaires qui sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Période de vacances scolaire**heures d'ouverture**

16 au 27 septembre	Lundi	7h15-12h15	13h30 - 14h40
4 au 8 novembre	Mardi	7h15-12h15	13h30 - 14h40
16 décembre au 10 janvier	Mercredi	7h15-11h15	
17 au 21 février	Jeudi	7h15-12h15	13h30 - 14h40
2 au 11 avril	Vendredi	7h15-11h00	
19 au 23 mai			
3 juillet au 8 Aout			

Ecole de conception récente

L'étude numérique des écoles de conception récente a principalement porté sur l'étude des protections solaires des baies. Deux modélisations ont été es: une représentation détaillée (Figure 48 à gauche) sous sketchup pour évaluer les ombres portées par les protections solaires et la présence de rayonnement direct sur les baies au cours de la journée ainsi qu'une modélisation simplifiée (Figure 48 à droite) pour déterminer le comportement thermique des salles de classe avec Energy plus.

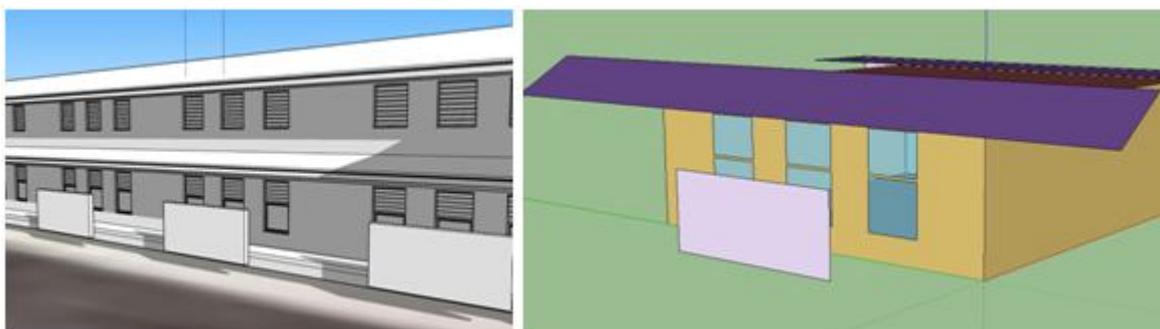


Figure 48 : représentation numérique détaillée (gauche) et simplifiée (droite) d'une école récente.

7.3.2. Présentation des résultats de simulation pour les écoles anciennes

Compte tenu des résultats expérimentaux obtenus et présentés précédemment, l'étude numérique s'est déroulée en deux temps :

- Identification du potentiel d'amélioration des prescriptions classiques en conception tropicale : protection solaire et ventilation traversante.
- Estimation du cout énergétique et financier de la climatisation des salles de classe dans les écoles.

Potentiel d'amélioration des conditions des confort dans les écoles anciennes

Les préconisations testées dans cette partie de l'étude sont (Tableau 11):

- Protection solaire de la toiture par isolation thermique à l'aide d'un isolant conventionnel (hors parois minces réfléchissantes) en 5 et 8cm d'épaisseur.
- Ventilation naturelle traversante avec débit d'air imposé exprimé en volume de renouvellement d'air par heure avec les valeurs 0,5, 5, 10 et 20 vol/h.
- Protection solaire des baies et éclairage naturel par vitrage réfléchissant (facteur solaire du vitrage = 0,3 et facteur de transmission lumineuse = 0,5)

Tableau 11 : préconisations testées dans les écoles de conception ancienne

Désignations		Commentaires
Protection solaire toiture	5 cm d'isolant 8 cm laine de verre	Conductivité : 0,04 W/mK Conductivité : 0,04 W/mK
Ventilation traversante	0,5 vol/h 5 vol/h 10 vol/h 20 vol/h	Stuation actuelle
Protection solaire des baies	Vitrage réfléchissant	TL=50%et S=30%

Isolation toiture

Le Figure 49 représente l'évolution des températures en fonction de l'isolation de la toiture en saison chaude. Une épaisseur d'isolation de 8cm correspond à un facteur solaire de 0,2 ce qui est la valeur généralement recommandée (voir référentiel PERENNE). L'évolution de la température montre qu'une isolation de 8cm améliore les conditions intérieures en limitant les températures maximales. Il apparait que l'inertie du bâtiment (voile de béton bandé 16cm) est forte et explique en partie aussi le décalage temporel entre la température extérieure et les températures intérieures.

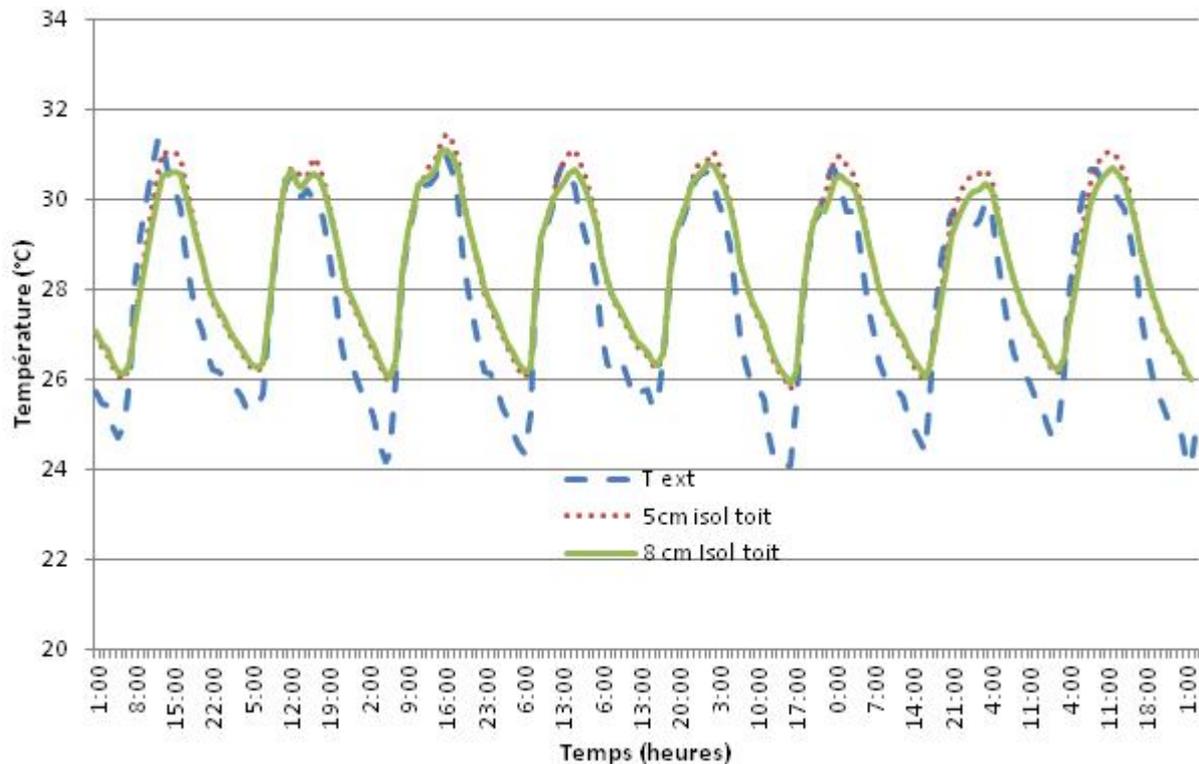


Figure 49 : influence de l'isolation toiture sur les températures intérieures en saison chaude

Ventilation naturelle

L'influence de la ventilation naturelle présentée Figure 50 est assez marquée. Cette forte influence est en partie due à la mauvaise qualité du bâti qui augmente les apports thermiques. Compte tenu des charges internes élevées (20 personnes présentes dans la zone), les débits de renouvellement d'air nécessaires sont plus importants que pour le logement individuel, puisqu'ils atteignent les valeurs de 20 vol/h. Sur le graphe, à partir du bâtiment de base (mauvaise isolation en toiture), plus le débit est élevé, plus les conditions intérieures se rapprochent des conditions extérieures. Cette évolution s'observe à la fois en période chaude et en période fraîche mais l'impact de la ventilation reste plus important en période chaude.

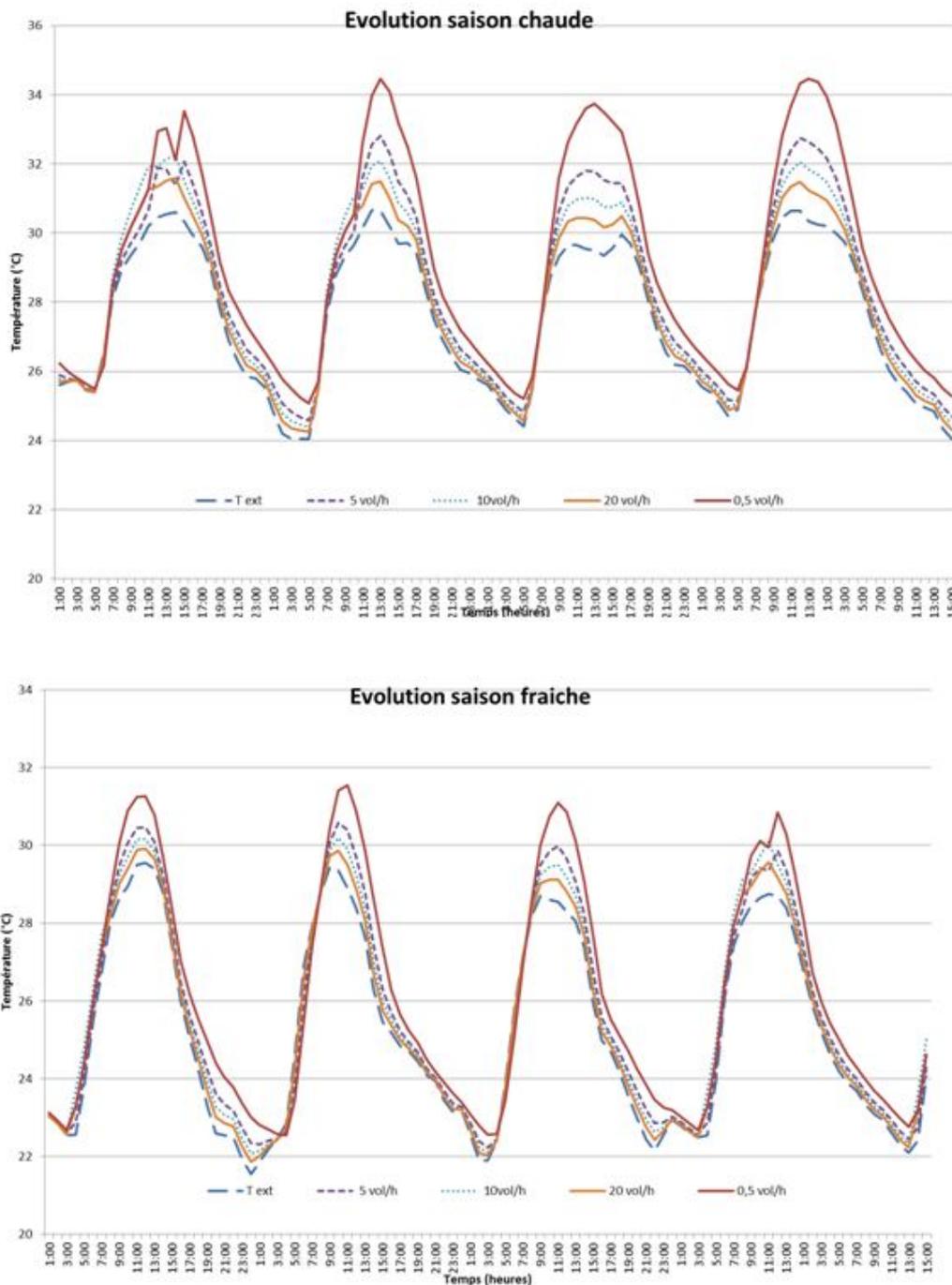


Figure 50 : évolution de la température en fonction de la ventilation pour les écoles anciennes

Vitrages

L'influence des vitrages a été évaluée pour prendre en considération les aspects de confort thermique et visuel. Les expérimentations ont montré que les usagers utilisaient des rideaux pour occulter les vitrages au détriment de l'éclairage naturel et de la ventilation traversante. Les niveaux d'éclairage mesurés sont généralement faibles (inférieurs à 250 lux) alors que la luminosité extérieure est forte (Figure 37). Les enseignants utilisent des rideaux pour réduire la luminosité à l'intérieur des salles de classe pendant les périodes de repos ou pour limiter le rayonnement direct le matin, sur les façades Est, et le soir, sur les façades Ouest. Le problème vient du fait que ces rideaux sont maintenus en place ou mal retirés dans la journée réduisant significativement la luminosité et limitant la ventilation. L'objectif des simulations présentées ci-après est d'évaluer l'impact thermique

et visuel de vitrage de bonne qualité. Ce type de vitrage se caractérise à la fois par un facteur solaire faible (de l'ordre de 30%) permettant de lutter contre le rayonnement direct et d'un facteur de transmission lumineuse relativement élevé (50%) afin d'assurer une bonne luminosité.

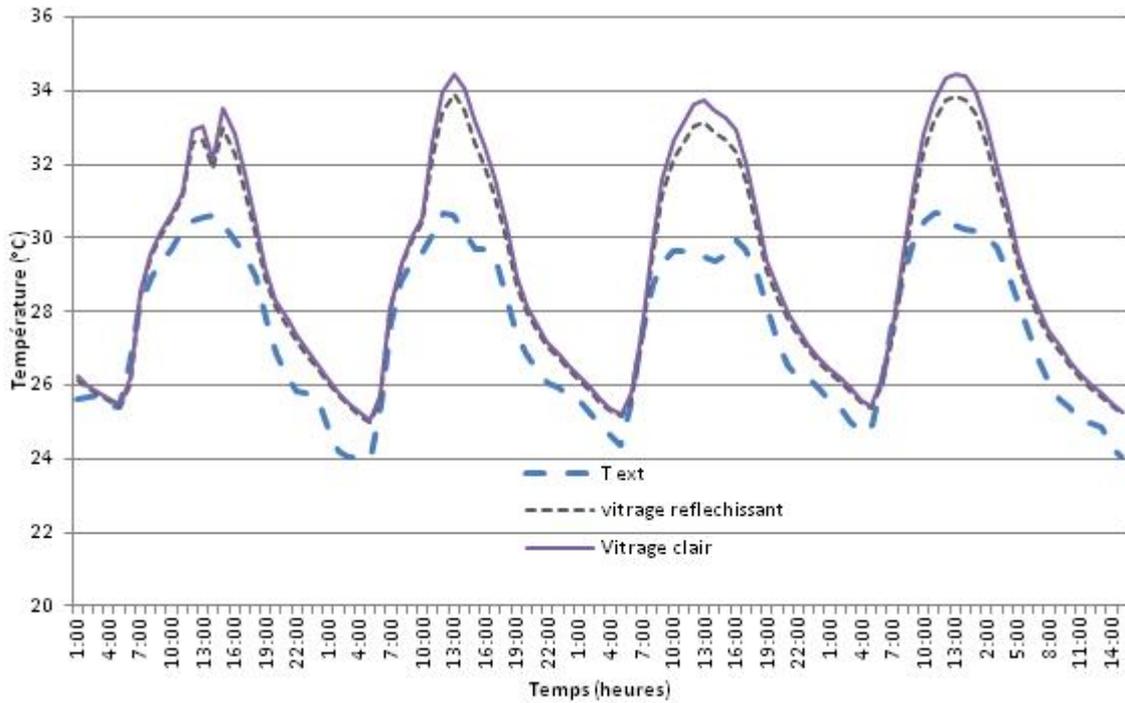


Figure 51 : Influence des caractéristiques des vitrages (clair et réfléchissant)

L'utilisation de vitrage réfléchissant permet de réduire les apports solaires en journée et de diminuer légèrement les maximums de température (de l'ordre de 0,5°C). Ceci sans remettre en cause le niveau d'éclairage intérieur puisque celui-ci est supérieur au niveau réglementaire de 400 lux.

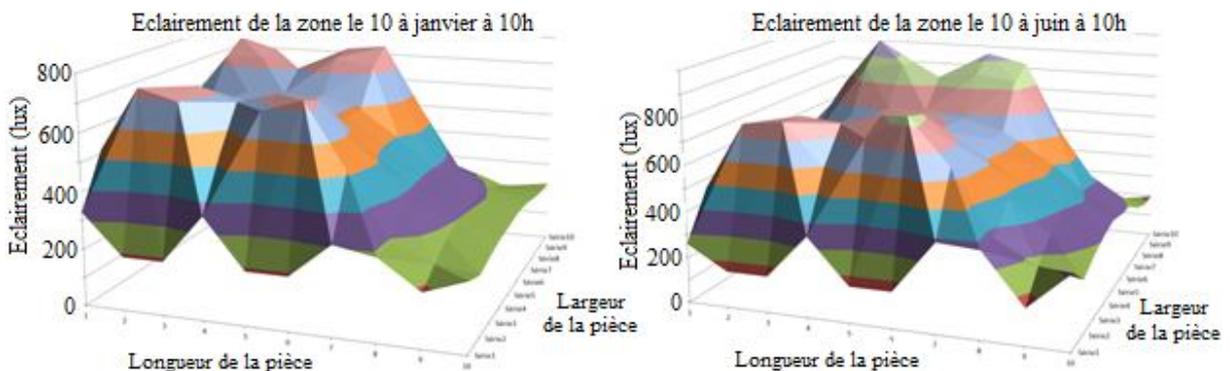


Figure 52 : niveau d'éclairage dans une salle de classe ancienne les 10 / 01 et 10 / 06 à 08h

Synthèse des prescriptions pour les écoles de conception ancienne

L'analyse des résultats de simulation pour les écoles de conception ancienne permet de valider certaines prescriptions « classiques » pour l'amélioration des conditions de confort. La **ventilation naturelle** est la prescription principale : Les débits de renouvellement d'air doivent être largement augmentés par rapport au cas de l'habitat. Une valeur cible pour le renouvellement d'air de l'ordre de 20 vol/h paraît nécessaire. Parallèlement les prescriptions concernant les protections solaires sont

aussi importantes mais identique à celle de l'habitat. Une problématique supplémentaire s'ajoute dans le cas des écoles : la gestion de l'éclairage naturel. L'utilisation de rideau par les usagers génère des inconforts thermiques importants et réduit la luminosité. Une solution peut être d'utiliser des verres de bonnes qualités thermiques et visuelles et d'éviter tout rayonnement direct dans les classes. Néanmoins il semble aussi nécessaire de prévoir des systèmes d'occultation pour les périodes de repos. Mais à notre connaissance, il n'existe pas de moyen d'assurer l'occultation de la lumière en préservant le passage de l'air. Une information des usagers est indispensable pour qu'ils gèrent correctement le dispositif d'occultation.

La Figure 53 présente les performances au travers du diagramme de Givoni pour une salle de classe de conception ancienne sans amélioration (brute) comparée à une salle améliorée avec les prescriptions suivantes :

- Isolation de la toiture 8 cm
- Ventilation naturelle équivalente à 20 vol/h
- Vitrages réfléchissants

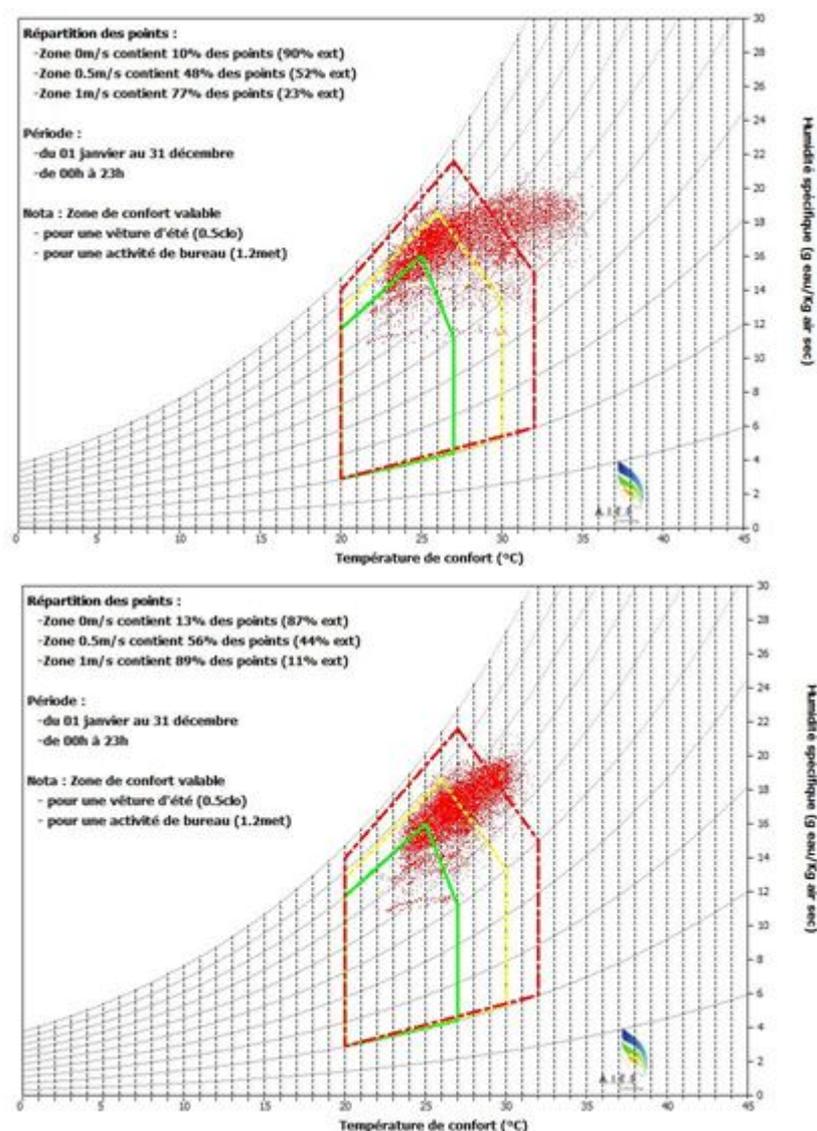


Figure 53 : comparaison du diagramme de Givoni pour l'école de conception ancienne brute (Gauche) et avec améliorations (droite)

Les gains en termes de confort sont significatifs mais il apparaît que la présence de brasseurs d'air est indispensable. Ils sont nécessaires 73 % du temps pour assurer une vitesse d'air de 0,5 ou 1 m/s. Il reste cependant 11% du temps où les conditions seront chaudes et il sera nécessaire d'avoir une vitesse d'air supérieure à 1m/s. Si on ne retient que les jours d'école, ce pourcentage passe à 27 % ce qui correspond à 196h d'inconfort par an. Les heures d'école de l'après-midi entre 13h30 et 14h30 sont les heures où le confort est le plus problématique.

7.3.3. Présentation des résultats de simulation pour les écoles de conception récente

Compte tenu des résultats expérimentaux, l'analyse numérique réalisée sur les écoles de conception récente est focalisée sur l'étude des protections solaires, basée sur l'analyse du facteur solaire.

Le facteur solaire S_{eq} est un indicateur déterminant permettant d'évaluer le flux de chaleur radiatif de courte longueur d'onde transmis à travers les parois. Dans notre cas, il sera évalué pour les parois opaques avec la formule suivante :

$$S_{eq} = C_m \frac{0,074 \times \alpha}{R_{th} + 0,19} = C_m \cdot S$$

Avec :

- S_{eq} : facteur solaire équivalent d'une paroi avec protection solaire.
- C_m : coefficient de réduction apporté par la protection solaire
- α : absorptivité de paroi, (=0,4 pour une teinte claire)
- R_{th} : résistance thermique de la paroi ($R_{th} = 0,103 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ pour les voiles béton 18 cm).

Pour les parois vitrées, le facteur solaire est donné par 1.

$$S = C_m \cdot S_0$$

- Ou S_0 est le facteur solaire du vitrage.

La difficulté de l'évaluation du facteur solaire réside dans l'estimation du coefficient de réduction C_m . Il peut être donné par des abaques en fonction de la latitude du lieu ou par des simulations réalisées à l'aide d'Energyplus.

Evaluation du coefficient de réduction des protections solaires

Dans cette étude et en l'absence d'abaques pour la Polynésie française, le coefficient de réduction C_m pour le calcul du facteur solaire des parois Est et Ouest est calculé à l'aide du code de calcul EnergyPlus. Il représente la part du rayonnement solaire direct incident sur la paroi. Sans protection solaire, le coefficient C_m vaut 1. Plus la protection solaire est efficace, et plus le coefficient C_m est faible.

Il est calculé en faisant le rapport de l'énergie annuelle reçue par les parois avec protection solaire sur l'énergie annuelle reçue par les parois sans protection solaire sur l'année. Ces quantités d'énergies sont des variables de sortie d'EnergyPlus.

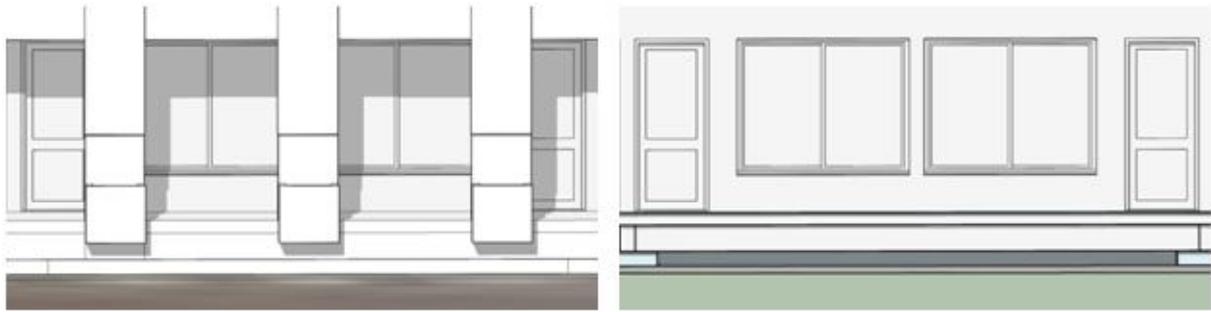


Figure 54 : Façade EST simulée avec et sans protection solaire à un instant t de l'année.

Les protections solaires prises en compte pour le calcul de O_m sont toutes les parties du bâtiment susceptibles de générer le moindre ombrage sur les parois Est et Ouest, à savoir :

- les remontées verticales
- la courive de l'étage dans son intégralité.
- Le débord de toiture de l'étage Est et Ouest
- Le mur de clôture Ouest

En coupe (Figure 55), cela revient à comparer l'irradiation reçue par les parois de la classe dans ces deux configurations.

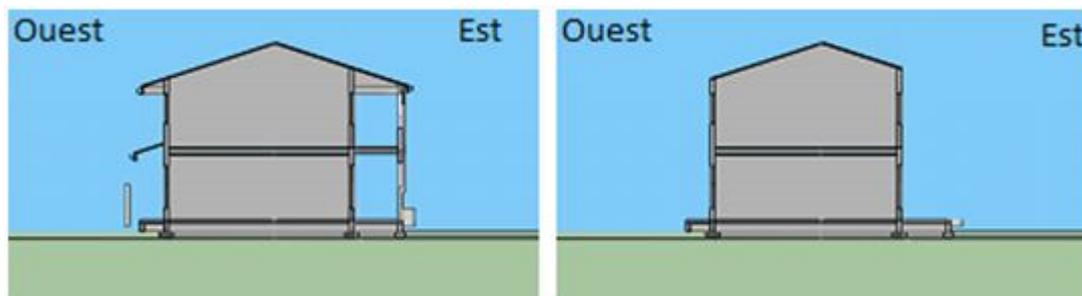


Figure 55 : Façades Est et Ouest en coupe avec (gauche) et sans (droite) protection solaire.

On obtient ainsi les valeurs des flux incidents des parois et des vitrages, avec et sans protection solaire (Tableau 12).

Tableau 12 : Coefficient de réduction O_m pour le calcul des facteurs solaires

Flux solaire direct incident sur les parois [kWh/an]	Paroi Est	Vitrage Paroi Est	Paroi Ouest	Vitrage Paroi Ouest
Avec protection solaire	906	1407	2582	1049
Sans protection solaire	3567	5616	6346	2312
O_m	0,25	0,25	0,4	0,45

L'observation qui découle de ce calcul est que les protections solaires de la paroi Ouest sont bien moins protectrices que celles de la paroi Est.

Lorsqu'on simule l'ajout à l'Ouest d'une protection solaire de type « retombée verticale » avec lames inclinées opaques en alu semblables à celles installées à l'étage côté Est, on parvient à réduire significativement le coefficient de réduction. D'une hauteur de 65cm et positionnées au niveau de la planche de rive du débord de toiture, ces protections produisent un nouveau coefficient de réduction 0_{m} pour la paroi opaque Ouest de 0,23 et de 0,19 pour le vitrage Ouest. L'exemple ci-après est donné pour le 1^{er} Février à 15h00.

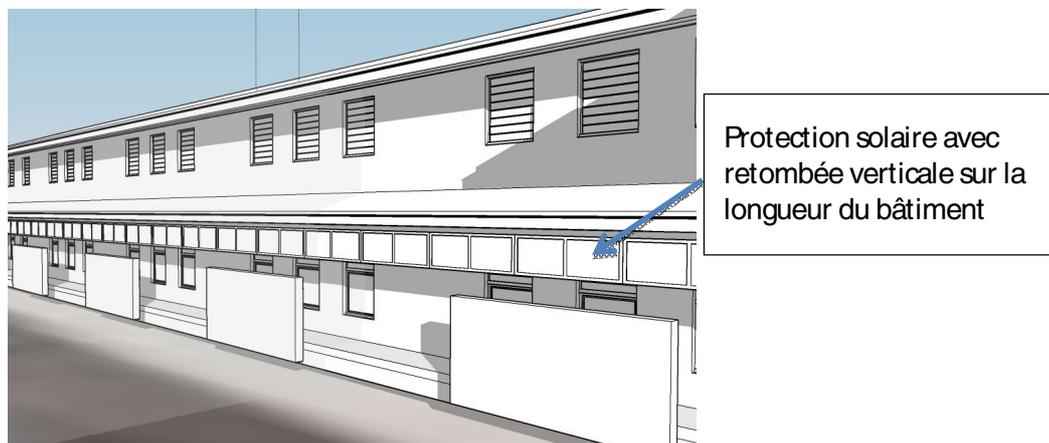


Figure 56 : Façades Ouest avec protection solaire de type retombée verticale.

Facteur solaire équivalent

Le Tableau 13 donne les valeurs des facteurs solaires des parois opaques Est et Ouest ainsi que pour les vitrages Est et Ouest.

Tableau 13 : Valeurs du facteur solaire équivalent

Facteur solaire équivalent	Paroi EST	Paroi OUEST	Vitrage EST	Vitrage OUEST
S_{eq} Actuel	0,025	0,040	0,25	0,45
Référence PERENE (île de La Réunion zone 1 et 2)	0,05		0,3	0,25
S_{eq} avec protection sur façade OUEST	-	0,023	-	0,19

La valeur calculée du facteur solaire avec protection prend en compte l'ajout d'une protection solaire de type retombée verticale sur la paroi Ouest comme décrite dans l'encadré du paragraphe précédent.

Les valeurs de référence du facteur solaire décrite dans le rapport PERENE de 2004 sont établies pour les zones 1 et 2 (zones littorales au vent et sous le vent) pour l'île de La Réunion.

Les valeurs des facteurs solaires obtenues pour les parois opaques Est et Ouest ainsi que pour le vitrage Est sont conformes et même meilleures que les exigences du référentiel PERENE pour La Réunion. Seul le vitrage Ouest possède un facteur solaire supérieur qui peut être corrigé par une protection solaire supplémentaire.

NOTA :

La référence aux valeurs indiquées dans le référentiel PERENE est proposée ici **à titre d'exemple et en l'absence de référentiel spécifique à la Polynésie française**. Afin de comparer les valeurs des facteurs solaires du bâtiment à des valeurs cibles validées pour des climats proches, il a été choisi celles pour les zones littorales de La Réunion.

Cette analyse des facteurs solaires met en évidence les points suivants :

- Les valeurs des facteurs solaires pour les parois opaques du bâtiment réel sont globalement bonnes (0,025 pour l'Est et 0,04 pour l'Ouest) et inférieures aux valeurs validées pour le climat de La Réunion (0,05 pour les parois Est et Ouest).
- Les valeurs des facteurs solaires pour les baies du bâtiment réel sont globalement bonnes (0,25 pour l'Est) et conformes aux valeurs de La Réunion (0,3). Elles sont par contre plus élevées pour les baies orientées à l'Ouest (0,45) et supérieures aux valeurs validées pour La Réunion (0,25).
- Néanmoins, il apparaît que pour les parois Est, bien que le facteur solaire soit plutôt bon, un rayonnement solaire direct pénètre dans le bâtiment le matin occasionnant des surchauffes.
- Si on se réfère donc aux valeurs proposées pour La Réunion, l'élément qui semble nécessiter une correction est donc le facteur solaire des baies orientées à l'Ouest.

Traitement des baies orientées à l'OUEST

Les simulations proposées ci-après ont pour objectif d'établir le comportement d'un bâtiment satisfaisant à des exigences telles que celles proposées par le référentiel PERENE toujours en se basant sur des valeurs cibles pour le climat de La Réunion et toujours à titre d'exemple.

Les simulations dynamiques réalisées permettent de retrouver le comportement thermique du bâtiment réel. En effet, celles-ci montrent que la température intérieure évolue comme dans la réalité avec des pics en début et fin de journée, et un rafraîchissement très modéré pendant la nuit. A l'aide de la simulation (Figure 57), il est possible de visualiser l'impact de l'ajout d'une protection solaire sur la paroi Ouest du bâtiment (qui est le seul point de non-conformité à PERENE Réunion).

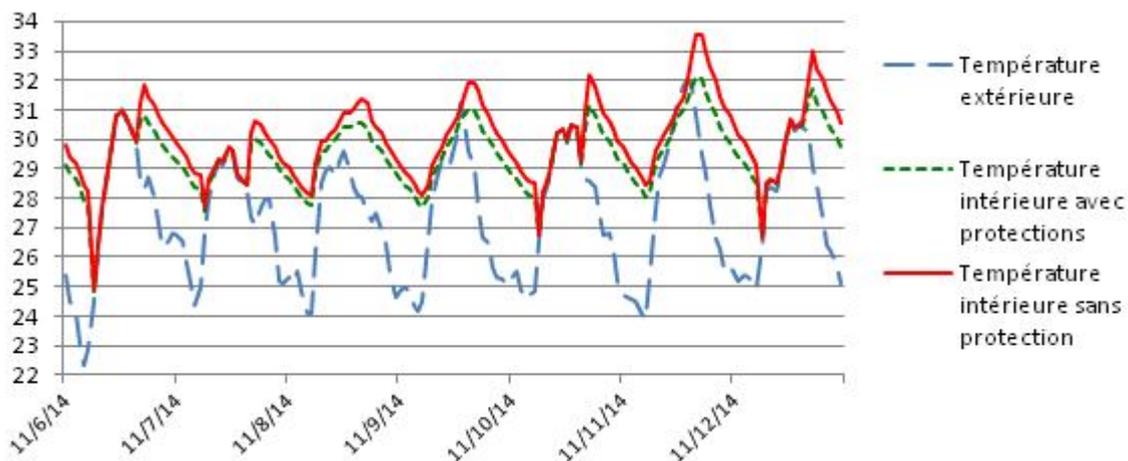


Figure 57: Simulation du bâtiment dans les conditions actuelles, et avec l'ajout d'une protection solaire à l'ouest.

Les conditions intérieures s'améliorent légèrement avec de nouvelles protections solaires car la température maximale diminue de 1°C à 1,5°C. Compte tenu des valeurs des températures extérieures, il reste cependant un potentiel de rafraîchissement nocturne inexploité, indispensable pourtant à l'amélioration du confort des occupants. Ce potentiel n'est pas exploité du fait de la fermeture des ouvertures la nuit.

L'analyse de ces résultats numériques montre que :

- L'amélioration des protections solaires du bâtiment permet de diminuer les surchauffes.
- Les conditions intérieures restent chaudes ce qui laisse à penser que :
- Les valeurs cibles pour les facteurs solaires en Polynésie française doivent être validées et devront sans doute être plus exigeants que ceux pour La Réunion.
- Les usages interfèrent avec les conditions de confort de façon très significative (a fermeture la nuit et l'obstruction le jour des ouvertures notamment ne permettent pas l'évacuation des charges externes).

7.4. Problématique de la climatisation des salles de classe en Polynésie

Comme dans de nombreuses régions de climat chaud, la question de la climatisation des salles de classe est un enjeu énergétique majeur pour la Polynésie française. Cette question est régulièrement évoquée lors des périodes chaudes par les personnels enseignants, par les élèves et parents d'élèves mais aussi par les représentants politiques. Cette solution si elle était envisagée engendrerait des surconsommations énergétiques importantes ayant des conséquences financières considérables.

L'étude proposée ci-après a permis d'évaluer la consommation énergétique supplémentaire occasionnée par l'installation d'un système de climatisation dans une salle de classe de conception ancienne sans aucune amélioration du bâti (c'est ce qui se fait en général) et dans une salle de classe pour laquelle le bâti a été amélioré.

Les hypothèses pour la simulation du système de climatisation retenues sont les suivantes :

- Système de classe A (EER=3,6)
- Renouvellement d'air hygiénique 15m³/h/personne
- Température de consigne : 26°C
- Contrat de maintenance avec visite régulière.
- Coût moyen de l'électricité 36,7 FCP

Les résultats proposés au [Tableau 14](#) indiquent les puissances des équipements à installer par salle, la consommation supplémentaire apportée par la climatisation et le coût financier correspondant.

Tableau 14 : Puissance, consommation et coût pour la climatisation des salles de classe

Climatisation des salles de classe	Puissance à installer par classe (kW / Btu/h)	Consommation électrique de la climatisation (kWh/an)	Coût moyen annuel (Fcp)
Classe sans amélioration	10,6 kW / 36 000 Btu/h	7 900	290 000
Classe avec amélioration du bâti	7,8 kW / 27 000 Btu/h	3 800	139 000

Ces estimations sont réalisées sur la base des bâtiments observés dans cette étude et sur la base des hypothèses citées précédemment. Elles peuvent varier significativement si ces paramètres sont modifiés. Notamment il apparaît que les températures de consigne sont rarement 26°C mais très

souvent 25 ou 24°C. Comme le montre le [Tableau 15](#) une diminution de la température de consigne a des conséquences importantes sur la consommation. Dans le cas d'une salle de classe 1°C en moins sur la consigne correspond à une augmentation de la consommation électrique de la climatisation de 36%. Cette augmentation importante est due aux fortes charges internes (personnes) du local.

Tableau 15 : évolution de la consommation de la climatisation en fonction de la température de consigne.

Climatisation des salles de classe avec bâti amélioré	Puissance à installer par classe (kW / Btu/h)	Consommation électrique de la climatisation (kWh/ an)	Coût annuel (Fcp)
Température de consigne 25°C	9,6 kW / 32 600 Btu/h	5 200	190 840
Température de consigne 24°C	11,7 kW / 40 000 Btu/h	6 600	242 220

7.5. Synthèse de l'étude de la typologie école

Cette étude consacrée à la typologie école apporte un certain nombre d'enseignements à retenir pour la conception de futurs projets. Certaines prescriptions sont similaires à celles pour la typologie habitat :

- L'utilisation de brasseurs d'air en complément de la ventilation est indispensable
- La protection solaire de la toiture doit cibler un facteur solaire maximum de 2%

D'autres prescriptions sont spécifiques ou ciblent des valeurs différentes :

- La ventilation naturelle traversante est le paramètre principal pour l'obtention du confort en évolution passive des salles de classe. Les débits à mettre en jeu sont sensiblement plus élevés que pour les habitations avec un taux de renouvellement minimum de 20vol/h.
- Les protections solaires doivent être dimensionnées avec beaucoup de soin pour éviter tout rayonnement direct à l'intérieur de la pièce et à tout moment de la journée.
- Des solutions d'occultation originales doivent être trouvées pour réduire la luminosité à certaines heures sans pénaliser la ventilation naturelle.
- Les utilisateurs doivent être sensibilisés à la gestion efficace de la ventilation et de l'éclairage naturel.
- Enfin, le recours la climatisation des salles de classe aurait des conséquences énergétiques et financières extrêmement importantes.

8. ÉTUDES DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION « LOCAUX »

La mise en place d'une future réglementation énergétique va imposer des calculs réglementaires de facteur solaire pour les parois des bâtiments. Ces calculs nécessitent de connaître les paramètres thermo physiques des matériaux utilisés. Ces paramètres sont actuellement peu ou pas connus pour un grand nombre de matériaux locaux. Pour favoriser leur utilisation et maintenir l'activité industrielles lié à leur production ou transformation, il est nécessaire caractériser physiquement ces produits.

L'objectif de cette partie du projet est de qualifier expérimentalement les conditions intérieures et les performances énergétiques de diverses typologies de bâtiment en Polynésie française utilisant des modes constructifs différents basés sur l'utilisation de matériaux locaux. Beaucoup de bâtiments utilisent des matériaux de construction locaux (pandanus, niau, cocotiers, pin..) en Polynésie mais

leurs performances thermiques sont mal connues. Une évaluation par simulation numériques et instrumentation in situ sur échantillons a été initiée grâce à 3 cellules expérimentales réalisées dans le cadre du projet.

8.1. Les matériaux locaux utilisés dans la construction

Le recensement des matériaux locaux utilisés dans la construction n'est pas aisé car les filières d'approvisionnement ne sont pas toujours structurées. La sécurité de l'approvisionnement est un des enjeux de l'utilisation des ressources locales. Ainsi l'étude faite dans le cadre du projet COBIOPOL porte sur les matériaux produits et transformés localement (ni'au, pandanus, pin,..) ainsi que sur des matériaux importés en vrac mais transformés localement (bardeau de bois en pin douglas). Les matériaux couramment utilisés sont donnés dans le [Tableau 16](#) sur la page suivante.

Matériaux	Utilisation	Avantages	Inconvénients
Ni'au (palme de cocotier)	Couverture de toiture ou façade	Facile à trouver et à utiliser Source inépuisable en Polynésie Française Energie grise très faible	Durée de vie faible (1an) Très inflammable Peu résistant au vent fort
Bardeau bois	Couverture de toiture ou façade	Facile à trouver (magasin, palettes recyclées) Durée de vie assez longue (10 ans) Esthétique et robuste Recyclable Energie grise non négligeable pour les matériaux importés et transformés localement	Nécessite un savoir-faire spécifique charpente pouvant résister au poids du toit en bardeau Avoir une bonne étanchéité Prix élevé du m ² (8388 frcs/m ²) Inflammable
Pandanus	Très utilisé pour la couverture de toiture (retrouve souvent dans les lieux touristiques)	Facile à trouver Confort convenable (connaissance) Très esthétique Production locale Recyclable Energie grise très faible	Nécessite un savoir-faire spécifique Avoir une bonne étanchéité Très inflammable
Bambou	Utilisé essentiellement pour la charpente	Facile à trouver Facile à utiliser Esthétique et robuste Production locale Recyclable Energie grise très faible	Très coupant Inflammable Quantité faible

Tableau 16 : tableau des matériaux utilisés couramment en toiture en Polynésie Française.

8.2. Méthodologie d'étude

La caractérisation des performances énergétiques des matériaux se fait en deux étapes :

- Une étude comparative expérimentale. Elle consiste à mesurer le comportement des différents matériaux sur des cellules expérimentales et de les comparer à un matériau de référence. Les matériaux locaux testés sont le Pandanus et le bardeau de pin utilisé en revêtement de toiture. Ils seront comparés à une toiture de référence utilisant une tôle d'acier.
- Une évaluation des propriétés thermo physiques par des méthodes dites inverses d'estimation des paramètres. Il s'agit de reproduire par des simulations numériques les expérimentations réalisées sur les cellules d'essai. On compare ensuite les valeurs simulées aux valeurs expérimentales et on ajuste les propriétés des matériaux afin que les simulations se calent sur les expérimentations. On peut ainsi estimer la conductivité thermique équivalente d'un matériau homogène ou la résistance thermique équivalente d'un matériau multicouche ou hétérogène.

Le dispositif expérimental réalisé pour cette étude consiste en 3 cellules identiques l'une comportant une toiture en pandanus, une en bardeau de pin et la dernière en tôle. Les cellules sont des cubes de 1,2 x 1,2 x 1,2 m sur lesquels sont disposés les 3 types de toitures avec une inclinaison conforme aux règles de l'art. Les parois verticales et le sol des cellules sont réalisés en plaques de fibrociment isolé par 5 cm de laine de roche.



Figure 58 : cellules expérimentales d'essai de nouveaux matériaux

Les cellules sont implantées sur le site de l'OGT à l'UPF. Une station météorologique Davis est installée sur les containers de l'OGT pour relever les conditions climatiques lors des essais.

8.3. Premiers résultats expérimentaux

Des premières séries d'expérimentation ont pu être réalisées à la fin du projet COBIOPOL. Une comparaison expérimentale du comportement des 3 toitures sur une journée est proposée à titre d'exemple à la figure ci-après. L'évolution des températures à l'intérieur de chaque cellule montre que les 3 toitures ont des comportements différents. Ces premiers essais sont réalisés en utilisant les matériaux seuls, sans isolant supplémentaire. Dans ces conditions, la toiture tôle est comme on pouvait l'imaginer très défavorisée et montre des performances beaucoup moins bonnes que le bois ou que le pandanus qui a les meilleures performances.

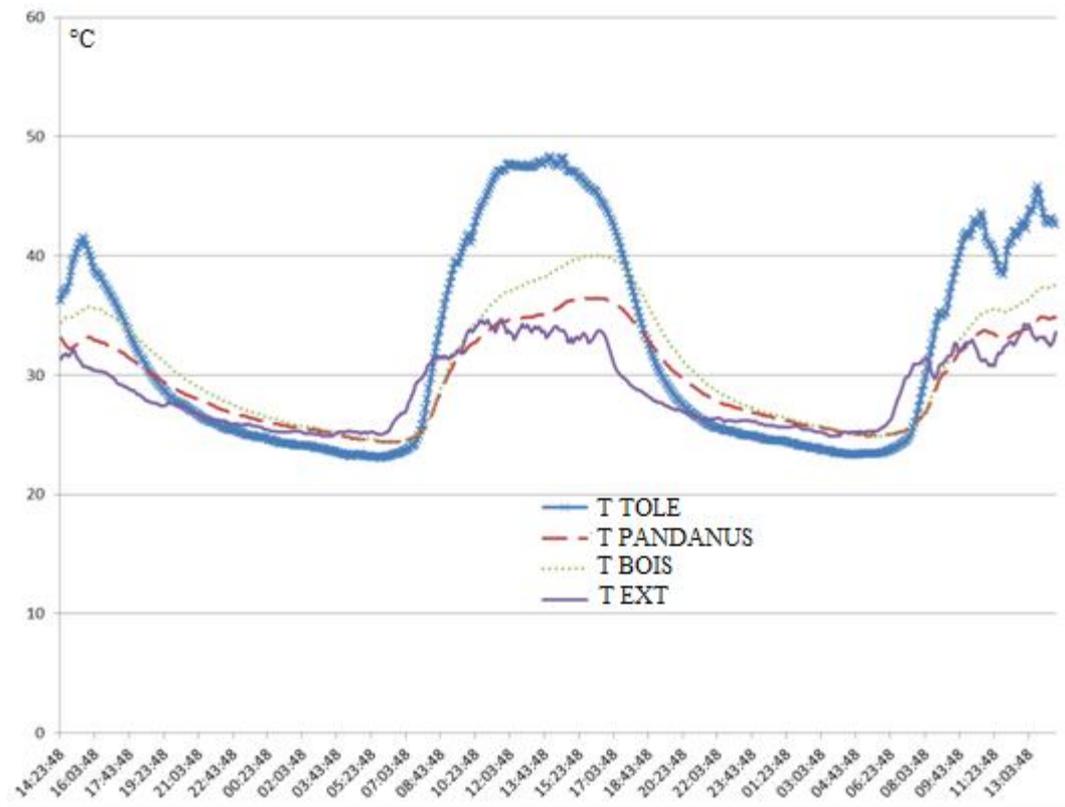


Figure 59 : comparaison expérimentale des 3 types de toitures

8.4. Synthèse et perspective pour l'étude des matériaux locaux de construction

Cette étude sur les matériaux locaux est loin d'être exhaustive. Elle doit être complétée par des expérimentations complémentaires où chaque matériau sera testé conformément à son mode constructif habituel. Notamment, la tôle est généralement utilisée avec un isolant classique ou PMR (parois mince réfléchissante). L'évaluation des caractéristiques thermo physiques des matériaux pourra alors être réalisée sur des bases « équitables ». Cette évaluation sera réalisée dans le cadre projet ECOMEB. Elle permettra de disposer de valeurs chiffrées pour réaliser des calculs réglementaires de résistance thermique ou de facteur solaire de toiture lorsque la réglementation énergétique sera applicable.

Il faut retenir que dorénavant, nous disposons d'un dispositif expérimental qui permet de tester différents types de matériaux de construction dans des conditions réelles d'utilisation.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le programme COBIOPOL nous a permis de construire un fichier TMY au format excel et epw. qui sera mis à disposition de tous les professionnels du bâtiment. A ce jour, ce fichier concerne les îles de Tahiti et Moorea mais dans un futur proche, une version à maille fine sera proposée. Ainsi, un fichier TMY sera associé à chaque maille d'environ 4km de côté sur tout le territoire de Tahiti.

Nous avons réalisé des cartes de vent sur Tahiti pour six régimes de vent avec une précision de quelques kilomètres. Les autres paramètres météorologiques, l'ensoleillement global, humidité et température, peuvent être calculés par le modèle. Pour ce faire un calculateur performant est indispensable. A l'heure actuelle nous utilisons le calculateur du Laboratoire De Géophysique de Pamatai et nous avons quelques pistes pour utiliser d'autres calculateurs comme celui de l'Université de La Réunion. Nous avons démarré les simulations numériques qui permettront de construire, dans un avenir relativement proche, les fichiers TMY en chaque point de grille du modèle avec une résolution de 1,3km. Grâce aux stations météorologiques acquises au cours de ce programme, nous pourrons lancer des campagnes de validation du modèle en certains points correspondant par exemple à des projets immobiliers (grands bâtiments, établissements scolaires...). Nous tenterons, dans le cadre d'un autre programme, d'effectuer des simulations à plus grande résolution (400m). Nous pourrons également faire des simulations d'épisodes extrêmes, avec des contraintes climatiques fortes sur les bâtiments. Les possibilités d'étude sont très nombreuses du moment qu'on possède les capacités de calcul et de stockage nécessaires pour la modélisation climatique.

Pour la partie conception bioclimatique des bâtiments proprement dite, nous avons combiné des campagnes de mesures in situ et de la simulation numérique. Lors des campagnes expérimentales nous avons mesuré les réponses thermique, hydrique et aéraulique de plusieurs bâtiments en fonction de sollicitations climatiques réelles. Nous avons étudié deux typologies de bâtiments : l'habitation traditionnelle appelée *fare*, ou *faré*, et des bâtiments d'écoles communales de constructions ancienne et récente. Ces campagnes expérimentales ont tout d'abord permis de quantifier les niveaux de confort (ou d'inconfort) mais également, et surtout, de « caler » les modèles numériques. En effet, cette étape « validation » est très importante si on veut accorder du crédit aux solutions proposées par le modèle pour corriger les défauts de conception en termes d'isolation thermique et d'aération principalement.

Le défaut commun récurrent est une mauvaise ventilation intérieure des bâtiments. Les logements accumulent des charges internes et externes dues aux fortes contraintes météorologiques et ne les évacuent pas (ou mal), même la nuit. La ventilation des logements est globalement insuffisante en raison de l'architecture des bâtiments ou d'une mauvaise utilisation des ouvertures existantes. La simulation numérique permet de quantifier les taux de renouvellement d'air qu'il conviendrait d'atteindre pour obtenir des conditions de confort acceptables sans apport de système de climatisation. En revanche, à ce jour, nous ne sommes pas capables d'établir une relation simple entre les circulations d'air extérieure (vent) et intérieure (ventilation).

Les problèmes d'isolation, au niveau des parois ou des toitures, ont également été traités par simulation numérique. Les résultats de simulation permettent de quantifier l'épaisseur d'isolant nécessaire à une isolation optimale. Enfin, la modélisation des bâtiments permet de rendre compte des effets des protections solaires et brise-soleils existants ou à prévoir, en particulier en début et fin de journée où le rayonnement solaire pénètre dans les logements.

Au titre des objectifs industriels du projet, une expérimentation comportant 3 cellules test et visant à qualifier les matériaux de construction locaux a été installée sur le site de l'UPF. Elle a permis de lancer des premières séries de mesures pour comparer des toitures en pandanus, en bardeaux de pin à une toiture conventionnelle en tôle. Les qualités thermiques des matériaux locaux ont pu être

prises en évidence, mais il est nécessaire de lancer des séries de mesures complémentaires ainsi que des simulations numériques pour déterminer exactement leurs propriétés thermo-physiques. Ce travail sera fait dans le cadre du projet ECOMEB.

Au cours de ces travaux, de nombreux contacts ont été établis avec les professionnels de la construction en Polynésie française (architectes, bureaux d'études, OPH...). Ces échanges ont permis d'opérer un transfert de compétences de l'UPF vers le monde industriel dans le cadre des études sur les données météorologiques, sur les écoles et les *fare* de l'OPH.

Ce programme a par ailleurs permis de développer à l'UPF une nouvelle thématique de recherche en phase avec la transition énergétique engagée par le gouvernement de la Polynésie française et fortement encouragée par l'Etat. Comme déjà souligné dans l'Avant-propos de ce document, cette conversion thématique de recherche s'est réalisée dans de très bonnes conditions grâce au financement du Ministère de l'Outre Mer, de l'antenne de l'Ademe en PF et de la CCISM. Nous espérons poursuivre et développer notre expertise dans le domaine de l'éco-construction et de la maîtrise d'énergie par le biais d'une thèse de doctorat démarrée en janvier 2016 et dont le sujet porte sur la modélisation de la circulation d'air dans les bâtiments et sur la caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction locaux. Fort de cette nouvelle expérience, et dans un avenir plus proche, nous espérons apporter une contribution effective à la rédaction de la réglementation énergétique en cours en Polynésie française.

ANNEXE : Problématique de l'isolation des toitures par PMR en Polynésie

Actuellement, le faré que nous avons étudié est équipé d'une isolation en toiture de type PMR (Produit Mince Réfléchissant) Durafoil. Ce type d'isolant est très utilisé en Polynésie française. Il fonctionne grâce ces propriétés radiatives de faible émissivité et à sa mise en œuvre. Celle-ci suppose la présence de lame d'air d'au moins 2 cm au-dessus et au-dessous de l'isolant. Étant fabriqué en Afrique du Sud, le produit Durafoil (de même que le produit Ssalation) de la société DAMAX (Figure 60), ne fait pas l'objet d'avis technique permettant de définir précisément ses performances selon les normes d'évaluation européennes. Du fait de leurs performances en climat tempérés et froids ce type d'isolant a été très controversé en métropole dès leur diffusion sur le marché. La note d'information GS20 du 12 décembre 2007 établie par le CSTB précise les performances moyennes des PMR :

- La résistance thermique intrinsèque des PMR multicouches est comprise entre 0,1 et 1 m².°C¹.W⁻¹
- La résistance thermique des PMR multicouches mis en œuvre en incluant la contribution des lames d'air au-dessus et au-dessous du produit vari entre 0,5 et 2 m².°C¹.W⁻¹

L'étude expérimentale réalisée par Miranville [Miranville 2012] a permis d'établir une résistance thermique de 1,44 m².°C¹.W⁻¹ pour un PMR multicouche dans le cas d'un climat tropical (La Réunion) et pour une ventilation naturelle de la face supérieure du PMR. Cette valeur conduit à un facteur solaire de 0,027. Ce qui est une valeur conforme aux attentes de la RTAADOM mais qui reste relativement élevée si on souhaite concevoir des bâtiments performants et non pas juste conformes à une réglementation.

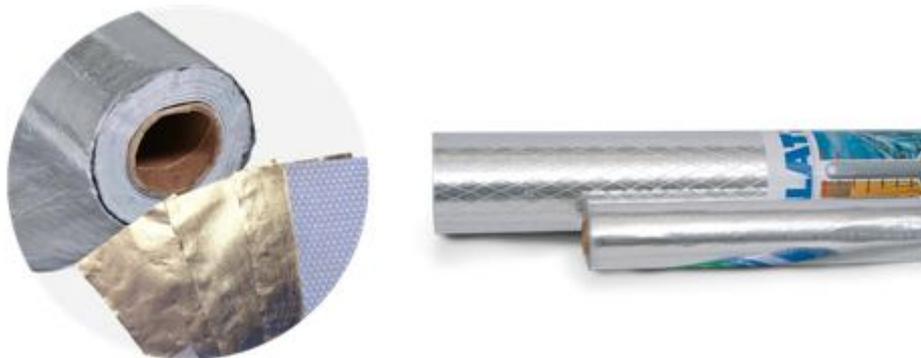


Figure 60 : isolant mince réfléchissant monocouche Durafoil et Ssalation

Dans le cadre de ses avis techniques, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) évalue des valeurs de facteur solaire par la méthode de calcul Th E différente des méthodes de calcul pour les climats chauds. La formule établie dans la Règlementation Thermique Acoustique et Aéraulique des DOM (RTAADOM) donne le facteur solaire par :

$$S_{eq\ ref} = \frac{0,074 * C_m * \alpha}{R_{th} + 0,19}$$

En utilisant les valeurs de résistance thermique minimales et maximales établies dans la note d'information GS20, et en supposant une absorptivité de la surface extérieure de 0,6, les calculs du facteur solaire d'une toiture donnent des valeurs comprises entre 0,063 et 0,020. Il faut préciser que ces valeurs concernent des matériaux PMR multicouches. Le Durafoil étant monocouche la valeur du facteur solaire d'une toiture équipée de Durafoil est sans doute plus proche 0,06. Pour information

la RTAADOM impose que le facteur solaire de la toiture soit inférieur à 0,03 pour les toitures et le référentiel PEPENE (applicable à La Réunion), plus exigeant, impose une valeur de 0,02.

A ce jour, 4 produits de ce type disposent d'un avis technique par le CSTB. Ils sont envisagés comme complément d'isolation et non en utilisation seule. Ces produits ont été testés dans des conditions de climat tempéré en logique de confort d'hiver (locaux chauffés) et en logique de confort d'été. Contrairement au Durafoil, ces produits sont généralement multicouches avec une épaisseur totale variant de 10 à 50 mm (Figure 61). Ils comportent plusieurs couches de ouate de polyester ou des couches film de polyéthylène à bulles et plusieurs couches de films réfléchissants. Précisons que le Durafoil est un matériau monocouche constitué par une simple feuille réfléchissante de moins 1mm d'épaisseur.

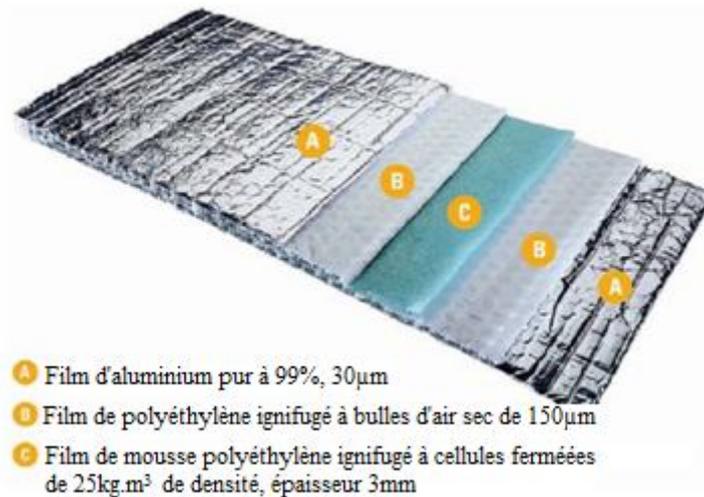


Figure 61 : Isolant mince réfléchissant multicouche.

Le CSTB donne peu d'information sur le vieillissement de ces produits et sur l'évolution des propriétés radiatives. Les essais faits par les fabricants ne concernent que des périodes courtes (28 jours) à des températures et humidités élevées (70°C et 90 %). Il n'est pas tenu compte de l'influence de l'empoussiérage puisque les conditions de mise en œuvre imposées limitent la pénétration de poussières dans les lames d'air.

Ces conditions de mise en œuvre laissent envisager deux possibilités de montage (Figure 62):

- avec 1 lame d'air. Elle est toujours située du côté chaud : coté inférieur pour les toitures en climat froid et supérieur en climat chaud.
- avec 2 lames d'air situées de part et d'autre du PMR.

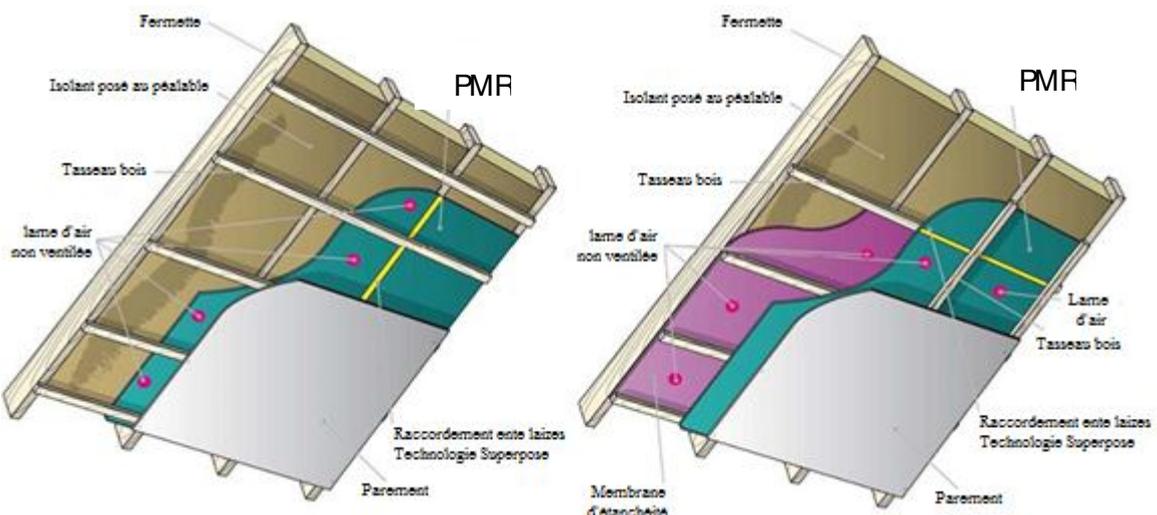


Figure 62 : mise en œuvre des PMR a 1 lame d'air (gauche) et 2 lames d'air (droite)

L'épaisseur minimum de la lame d'air doit être d'au moins 20mm du côté chaud de l'isolant (en dessous de l'isolant pour les climats froids). Le CSTB précise de plus qu'il faut rendre la lame d'air du côté chaud étanche à l'air (lame d'air non ventilée). Cette disposition améliore la résistance thermique de la lame d'air et évite l'empoussiérage du PMR et donc la dégradation de ses propriétés radiatives du côté chaud. L'étanchéité de la lame d'air chaude ne se justifie que dans le cas des climats froids ou tempérés ou le flux de chaleur est sortant.

Dans le cas des climats chauds, la logique est différente puisqu'on souhaite éviter la pénétration d'un flux de chaleur dans le bâtiment. Il faut donc éviter la stagnation d'air chaud au-dessus du PMR. Pour cela, il est préférable d'assurer la ventilation de la lame d'air supérieure afin d'éviter l'échauffement de l'air et la transmission de chaleur par conduction à travers le PMR. Dans ce cas, l'accumulation de poussière sur la face supérieure du PMR peut affecter ses performances radiatives de façon significative. A notre connaissance il n'existe pas d'études abordant la dégradation des performances dans le temps des PMR en climat chaud.

Autre point crucial : la mise en œuvre. Outre la présence et la ventilation de la lame d'air supérieure pour les climats chauds, l'assemblage des feuilles de PMR a un impact important sur la performance thermique. Lorsqu'il y a deux lames d'air, il est indispensable d'éviter toute communication d'air entre la lame inférieure et la lame supérieure. De ce fait les fabricants précisent les caractéristiques de recouvrement des feuilles à respecter (entre 50 et 100 mm) ainsi que les modes de fixation sur les éléments de charpentes.

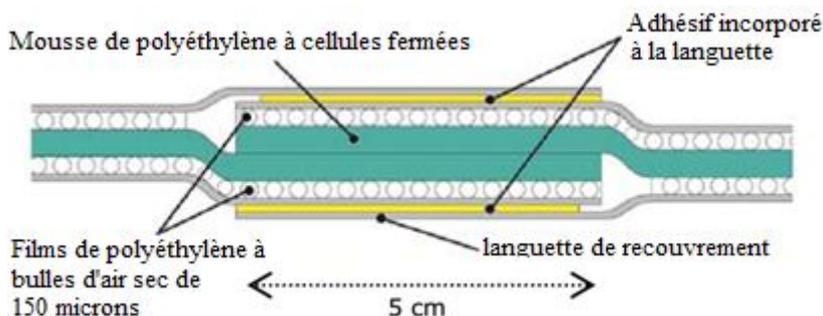


Figure 63 : recouvrement des feuilles de PMR

Les performances thermiques des PMR sont donc très sensibles à de nombreux paramètres (climat, mise en œuvre). De plus la pérennité de ces performances dans le cas des lames d'air ventilées n'a pas été établie et est sujet à débat. La valeur de la résistance thermique des toitures comportant un isolant de type PMR monocouche de type Durafoil est difficile, voire impossible, à évaluer. Dans l'étude numérique proposée plus loin, nous traiterons la question de l'isolation du faré à l'aide d'isolants conventionnels.

RÉFÉRENCES

[Drury 1998]

Drury B. Crawley. 1998. "[Which Weather Data Should You Use for Energy Simulations of Commercial Buildings?](#)" in ASHRAE Transactions, pp. 498-515, Vol. 104, Pt. 2. Atlanta: ASHRAE

[Erbs 1982]

Erbs G., Klein S. A., Duffie J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Sol. Energy* 1982, 28 (4), 293-304.

[Hopuare, 2016a]

M.Hopuare, A. Jamelot, F. Lucas, C. Besnard and P. Ortega : High resolution wind regimes over Tahiti, French Polynesia, using the WRF-ARW mesoscale model, *Climat-2016*, Aalborg, Denmark, May 2016

[Hopuare, 2016b]

M.Hopuare, F. Lucas, C. Besnard and P. Ortega : Caractérisation multi-échelle du climat de la Polynésie française pour la simulation dynamique de bâtiments, *Conférence IBPSA France – Marne-la-Vallée – 2016*

[Hopuare 2015]

M. Hopuare, M. Pontaud, J.P. Céron, M. Déqué, P. Ortega : Climate change assessment for a small island: a Tahiti downscaling experiment, *Clim Res*, Vol 63, pp233-247, doi:10.3354/cr01298

[Lenoir, 2010]

A. Lenoir, E. Ottenwelter, A. Bornarel, O. Hernandez, and F. Garde. État de l'art des bâtiments à énergie positive en France. retour d'expérience et comparaison des consommations énergétiques calculées en phase de conception et mesurées en phase d'utilisation du bâtiment. In *conférence IBPSA France*, 2010.

[Lucas, 2015]

F. Lucas, P. Ortega, M. David, F. Snama, B. Brangeon, F. Plogirard : A Method to Evaluate Energy Performance of Buildings Cooled by Room Air Conditioners, *Energy Procedia*, Vol. 75, pp 1275–1283, (2015)

[NCDC, 1993]

NCDC. Solar and Meteorological Surface Observation Network, 1961-1990, Version 1.0, September 1993. Asheville, North Carolina: National Climatic Data Center, U.S. Department of Commerce.

[Ouedraogo, 2012]

E. Ouedraogo, O. Coulibaly, A. Ouedraogo. Elaboration d'une année météorologique type de la ville de Ouagadougou pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°1 (2012) 77 – 90

[Perez, 1992]

Perez, R., P. Ineichen, E. Maxwell, R. Seals, and A. Zelenka. (1992). Dynamic global to-direct irradiance conversion models. *ASHRAE Transactions Research*, 3578(FP 644), pp. 354–369.

[Remund, 2009]

Jan Remund. Comparison of test reference years to stochastically generated time series. CISBAT conference. 2- 3 September 2009.

[Skamarock , 2008]

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... & Powers, J. G. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR technical note, Mesoscale and Microscale Meteorology Division. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.

[Spitz, 2012]

Cara Spitz. Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments. Other. Université de Grenoble, 2012. French. <NNT : 2012GRENA004 > <tel-00768506 >

Liste des Figures

Figure 1 : Données d'entrée pour les simulations thermiques dynamiques des bâtiments	7
Figure 2 : Exemple d'une journée d'ensoleillement par temps clair (données Météo France)	12
Figure 3 : Régressions linéaires (Rayonnement Direct modélisé vs Rayonnement Direct mesuré) avec l'année de référence 1997	14
Figure 4 : Schéma d'un modèle de climat	15
Figure 5 : Schéma de la descente d'échelle avec WRF positionné sur une large région Pacifique central à 20 km de résolution et comme conditions aux bords la réanalyse Era Interim. Un deuxième domaine est implémenté à 4 km de résolution et positionné sur la Polynésie française. Un dernier domaine est implémenté dans le domaine 2 à 1.3 km centré sur Tahiti.	16
Figure 6 : Régimes de vents à 10m Era Interim sur un grand domaine Polynésie. La boîte verte localise Tahiti.	17
Figure 7 : Relief implémenté dans le modèle WRF	18
Figure 8 : Régimes de vents à 1.3 km de résolution simulés avec le modèle WRF (issues des six régimes de vent de la réanalyse Era Interim)	19
Figure 9 : En haut, séries temporelles de la température observée (courbe verte) et modélisée au point de grille le plus proche de la station (courbe rouge). En bas, vent zonal à 10 m observé (courbe verte) et modélisé au point de grille au sud-ouest de la station (courbe rouge). L'écart entre observation et modèle est représenté par une courbe bleue.	20
Figure 10 : Grille du modèle (domaine à 1.33 km de résolution) zoomée sur la partie nord-est de Tahiti. Les points bleus représentent les points de mer, les croix vertes les points de terre. L'astérisque rouge indique la station de Faaa. Une boîte noire entoure le point de grille le plus proche de la station, le mieux corrélé en terme de température avec la station de Faaa. Une autre boîte noire entoure le point de grille plus au sud-ouest, le mieux corrélé avec la station de Faaa en terme de vent.	21
Figure 11 : station de mesure autonome de données météorologiques	23
Figure 12 : présentation du totem de confort, capteurs associés et connexions	24
Figure 13 : Datalogger sans et avec affichage	25
Figure 14 : Structuration de l'outil Energyplus	25
Figure 15 : vue et plan de l'habitation traditionnelle	26
Figure 16 : diagramme de Givoni donnant les couples de température/humidité pendant la période de mesures	28
Figure 17 : zoom sur une journée. Evolution des températures (intérieure, extérieure et globe noir)	28
Figure 18 : Evolution de l'écart de température de globe – Température ambiante	29
Figure 19 : Représentation 3D du bâtiment	30
Figure 20 : Evolution des températures intérieures du bâtiment pour les différentes configurations d'isolation de la toiture.	31
Figure 21 : protection solaire par débord de toiture sur la périphérie du bâtiment.	32
Figure 22 : dimensions de la protection solaire des parois baies (gauche) et des murs (droite)	32
Figure 23 : efficacité des protections solaires des baies	33
Figure 24 : irradiation directe (courte longueur d'onde) totale des surfaces vitrées	33
Figure 25 : représentation schématique des brises soleil constitués de 3 lames orientables de largeur 30 cm inclinées ici à 30° par rapport à la verticale.	34
Figure 26 : Irradiation sur la surface vitrée exposée Ouest suivant l'indinaison du brise-soleil	34
Figure 27 : apports énergétiques mensuels sur les surfaces vitrées	35
Figure 28 : impact de la ventilation sur la température intérieure (avec isolation en toiture)	36
Figure 29 : évolution la température pour le bâtiment amélioré.	37
Figure 30 : diagramme de Givoni, pour le bâtiment modifié (gauche) et de base (droite)	37
Figure 31 : école de conception ancienne (Papetoai)	38
Figure 32 : disposition des salles de classe (école Te'avarō).	39
Figure 33 : intérieur d'une salle de classe récente	39
Figure 34 : évolution des températures et de l'humidité de la classe sur la période	40
Figure 35 : vitesse d'air à l'intérieur de la classe sur la période	41
Figure 36 : comparaison vent et vitesse d'air intérieure	41
Figure 37 : luminosité de la classe sur la période et du rayonnement solaire (en rouge, exprimée en Lux, en bleu, exprimée en W/m ²)	42

Figure 38 : Diagramme de confort de Givoni pour une salle de classe de conception ancienne en période chaude	42
Figure 39 : Diagramme de confort pour le cas des écoles de conception récentes	43
Figure 40 : Vitesse de déplacement de l'air (m/s)	43
Figure 41: Analyse des vents	44
Figure 42 : Température et luminosité	45
Figure 43 : course du soleil le 01 février 2014	45
Figure 44 : Ombres portées sur la façade EST à 06h00 à gauche et 9h30 à droite le 1er février	46
Figure 45 : Ombres portées sur la façade Ouest à 13h45 à gauche et 16h45 à droite le 1er février	46
Figure 46 : Température extérieures et intérieures mesurées	46
Figure 47 : modélisation des bâtiments et d'une classe type pour les écoles de conception ancienne (exemple Papetai)	47
Figure 48 : représentation numérique détaillée (gauche) et simplifiée (droite) d'une école récente.	49
Figure 49 : influence de l'isolation toiture sur les températures intérieures en saison chaude	50
Figure 50 : évolution de la température en fonction de la ventilation pour les écoles anciennes	51
Figure 51 : Influence des caractéristiques des vitrages (clair et réfléchissant)	52
Figure 52 : niveau d'éclairément dans une salle de classe ancienne les 10 / 01 et 10 / 06 à 8h	52
Figure 53 : comparaison du diagramme de Givoni pour l'école de conception ancienne brute (Gauche) et avec améliorations (droite)	53
Figure 54 : Façade EST simulée avec et sans protection solaire à un instant t de l'année.	55
Figure 55 : Façades Est et Ouest en coupe avec (gauche) et sans (droite) protection solaire.	55
Figure 56 : Façades Ouest avec protection solaire de type retombée verticale.	56
Figure 57: Simulation du bâtiment dans les conditions actuelles, et avec l'ajout d'une protection solaire à l'ouest.	57
Figure 58 : cellules expérimentale d'essai de nouveaux matériaux	61
Figure 59 : comparaison expérimentale des 3 types de toitures	62
Figure 60 : isolant mince réfléchissant monocouche Durafoil et Ssalation	65
Figure 61 : Isolant mince réfléchissant multicouche.	66
Figure 62 : mise en œuvre des PMR a 1 lame d'air (gauche) et 2 lames d'air (droite)	67
Figure 63 : recouvrement des feuilles de PMR	67

Liste des Tableaux

- Tableau 1 : Modèle exponentiel, année de référence : 1997 ; $c_0=7.122$ et $c_1=-3.511$
- Tableau 2 : Mesures des conditions climatiques
- Tableau 3 : description de la composition des murs et du plancher
- Tableau 4 : détails des menuiseries
- Tableau 5 : détail de la composition de la toiture et du faux plafond
- Tableau 6 : écart entre température de globe et température ambiante.
- Tableau 7 : Configuration d'isolation de la toiture
- Tableau 8 : apports solaires annuels en fonction en fonction des protections solaires
- Tableau 9: Occurrences des directions (haut) et des vitesses de vent (bas)
- Tableau 10 : quelques caractéristiques d'un bâtiment de conception ancienne
- Tableau 11 : préconisations testées dans les écoles de conception ancienne
- Tableau 12 : Coefficient de réduction C_m pour le calcul des facteurs solaires
- Tableau 13 : Valeurs du facteur solaire équivalent
- Tableau 14 : Puissance, consommation et coût pour la climatisation des salles de classe
- Tableau 15 : évolution de la consommation de la climatisation en fonction de la température de consigne.
- Tableau 16 : tableau des matériaux utilisés couramment en toiture en Polynésie Française.