

# L'INGÉNIERIE AU SERVICE DU BÂTI TROPICAL

## CLIMAYOTTE

**Adapter la conception bioclimatique des bâtiments tertiaires aux enjeux du  
changement climatique**

– SEPTEMBRE 2025 –

Simulations thermiques dynamiques



## SOMMAIRE

<b>1. GENERALITES.....</b>	<b>3</b>
1.1. LE REFERENTIEL MAYENERGIE PLUS.....	3
1.2. APPLICATION DE MAYENERGIE A MAYOTTE.....	4
1.3. LES SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES.....	5
<b>2. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....</b>	<b>6</b>
2.1. CONTEXTE ET CONSTATS.....	6
2.2. OBJECTIFS .....	6
<b>3. METHODOLOGIE.....</b>	<b>7</b>
3.1. ÉTAPE 1 : SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES PARAMETRIQUES SIMPLIFIEES.....	7
3.2. ÉTAPE 2 : ETUDE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES BIOCLIMATIQUES A HORIZON 2070 .....	11
3.3. ÉTAPE 3 : ETUDE DE 9 CONCEPTIONS - SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES DETAILLEES.....	12
3.4. ÉTAPE 4 : APPLICATION DE CAS.....	14
<b>4. HYPOTHESES.....</b>	<b>15</b>
4.1. GEOMETRIE .....	15
4.2. CONSTRUCTIONS.....	15
4.3. PROTECTIONS SOLAIRES.....	17
4.4. FONCTIONNEMENT.....	17
<b>5. LIMITE DE LA METHODOLOGIE ET DES HYPOTHESES DE MODELISATION .....</b>	<b>19</b>
<b>6. RESULTATS .....</b>	<b>21</b>
6.1. ÉTAPE 1 : SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES PARAMETRIQUES SIMPLIFIEES.....	21
6.2. ÉTAPE 2 : ETUDE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES BIOCLIMATIQUES A HORIZON 2070 .....	33
6.3. ÉTAPE 3 : ETUDE DE 9 CONCEPTIONS - SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES DETAILLEES.....	37
6.4. ÉTAPE 4 : APPLICATION DE CAS.....	46
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>66</b>

# 1. Généralités

## 1.1. Le référentiel MayEnergie Plus

À Mayotte, la conception bioclimatique des bâtiments est encadrée par le référentiel MayEnergiePlus. Le guide traite différentes thématiques et donne pour chacune des recommandations et préconisations. Les thématiques abordées sont :

### ***L'environnement du bâti***

Ce thème traite des orientations à l'échelle du plan masse. Les recommandations portent notamment sur l'implantation du projet dans son environnement, l'orientation des bâtiments et la végétalisation des abords du bâtiment.

### ***La ventilation naturelle traversante***

Les seuils de porosité, règles de calcul et répartition des ouvrants sur les façades sont présentés dans cette partie. Il est notamment demandé une porosité de 25% par pièces et que la façade principale ne présente pas plus de 60% de la somme des surfaces d'ouvrants.

### ***L'enveloppe du bâtiment – Protection solaire***

Les caractéristiques thermiques des parois opaques et vitrées sont présentées dans cette partie. L'exigence porte sur le facteur solaire qui dépend de la résistance thermique de la paroi ( $R_{th}$ ), du coefficient de masque apporté par la protection solaire ( $C_m$ ), et du coefficient d'absorption de la finition extérieure ( $\alpha$ ) selon la formule suivante  $FS = \frac{0,074 \cdot C_m \cdot \alpha}{R_{th} + 0,20}$  pour les parois opaques. Pour les vitrages, il dépend uniquement du facteur solaire initiale de la baie ( $S_0$ ) et du coefficient de masque ( $C_m$ ) selon la formule suivante :  $FS = S_0 \cdot C_m$

### ***Le renouvellement d'air et vitesse d'air***

Les débits d'air hygiéniques ainsi que les prescriptions portant sur les caractéristiques des brasseurs d'air sont renseignés dans cette partie.

### ***La performance énergétique***

Des seuils de consommation énergétique, et des prescriptions portant sur la régulation de l'éclairage et de la climatisation sont spécifiés dans cette partie.

### ***Le chantier vert***

La démarche de chantier à faible impact environnemental et les règles associées sont présentées dans cette partie.

## 1.2. Application de MayEnergie à Mayotte

L'application du référentiel MayEnergie n'est pas réglementaire et est laissée à l'appréciation du Maître d'ouvrage. En pratique, le guide est très largement appliqué par les maitrises d'ouvrage public (notamment la Région, le Rectorat et les communes) et les bailleurs sociaux. En revanche, le référentiel est beaucoup moins appliqué par les maitrises d'ouvrage privé, notamment sur les bâtiments tertiaire et industriel.

Lorsque le référentiel est appliqué sur des opérations tertiaires (bureaux, enseignement), dans leur volonté de proposer des espaces de travail confortables, plusieurs modes de fonctionnement thermiques sont couramment attendus par les maitres d'ouvrage appliquant le référentiel MayEnergie :

- Climatisation toute l'année

Les locaux à fortes charges internes comme les salles informatiques sont couramment concernés par ce mode de traitement thermique.

- Mode mixte, climatisation en été et ventilation naturelle en hiver

Les bureaux des administrations des établissements d'enseignement sont couramment concernés par ce mode de traitement thermique. Pour éviter une climatisation toute l'année, ce mode suppose une régulation claire au niveau des GTC des systèmes de climatisation notamment dans la définition des périodes de climatisation et de ventilation naturelle. Il se pose ici une question de performance de conception : une conception performante pour la ventilation naturelle le sera-t-elle aussi pour la climatisation.

- Mode passif, ventilation naturelle toute l'année :

Les salles de classe des établissements d'enseignement ainsi que d'autres locaux dans lesquels les objectifs de confort sont moins prioritaires sont concernés par ce mode de traitement d'air.

Concernant l'application des prescriptions de conception MayEnergie, celles qui sont le plus souvent rencontrées dans les programmes portent notamment sur la ventilation naturelle et la protection solaire. Elles sont identiques, peu importe le mode de traitement thermique des locaux. Elles sont présentées ci-dessous :

- Ventilation naturelle

- Locaux traversants
- Porosité des façades principales 25%

- Enveloppe du bâtiment – Protection solaire

- Facteur solaire toiture < 2%
- Facteur solaire murs < 5%
- Facteur solaire des vitrages < 25 à 30% selon l'orientation

Par ailleurs, il est couramment admis que pour atteindre les facteurs solaires des murs, le levier le plus efficace est la protection solaire : avant d'isoler une façade, il est plutôt conseillé de la protéger du rayonnement direct. Une **conception typique bioclimatique à Mayotte** est donc un bâtiment dont la porosité est entre 25 et 30% sur deux façades opposées, intégrant une isolation de la toiture. Les murs extérieurs ne sont pas isolés, mais plutôt protégés du rayonnement direct par des protections solaires adaptées à l'orientation.

Le référentiel MayEnergie intègre la possibilité de déroger aux prescriptions à condition de démontrer une performance équivalente. Cette justification peut être apportée notamment par une Simulation Thermique Dynamique (STD).

## 1.3. Les Simulations Thermiques Dynamiques

Les Simulations Thermiques Dynamiques (STD) sont des outils numériques permettant de modéliser et d'analyser le comportement thermique d'un bâtiment à partir des données d'entrées. Les données d'entrées peuvent être classées en trois catégories :

- Les données météorologiques caractérisant le climat extérieur :
  - Position géographique
  - Température d'air
  - Humidité relative
  - Irradiation solaire
  - Vitesse et direction du vent
- Les données relatives à la conception architecturale et technique du bâtiment :
  - Géométrie du bâtiment : volumétrie, ratio de porosité, protections solaires
  - Matériaux constitutifs des parois
  - Nature et performance des équipements techniques : luminaires, ventilation et climatisation, process
- Les données relatives à l'utilisation du bâtiment :
  - Densité et planning d'occupation
  - Puissance d'équipements, process et planning de fonctionnement
  - Mode d'utilisation de la climatisation et de la ventilation naturelle

Tandis que les données relatives à la conception sont souvent renseignées avec précision à mesure que la conception avance, celles relatives à l'utilisation du bâtiment correspondent souvent à des hypothèses de fonctionnement. Elles sont prises sur la base de scénarios d'utilisation standards, par typologie d'espace, et correspondent à un fonctionnement habituellement rencontré en exploitation. Ces données de bases sont adaptées au projet à partir des informations fournies par le maître d'ouvrage.

Contrairement aux approches statiques, les Simulations Thermiques Dynamiques prennent en compte les variations horaires des conditions extérieures et des conditions d'usages. Ainsi, elles permettent de prédire avec une précision dépendant des données d'entrée l'évolution des températures intérieures, des besoins énergétiques, du confort thermique des occupants. Elles permettent aussi de mettre en évidence les surchauffes estivales.

Les Simulations Thermiques Dynamiques peuvent être utilisées comme aide à la conception. En effet, elles offrent la possibilité de simuler l'impact de plusieurs solutions sur le comportement thermique d'un bâtiment.

Dans le cadre du projet CLIMAYOTTE, la Simulation Thermique Dynamique est utilisée pour quantifier les niveaux de performance associés à différentes conceptions.

## 2. Objectifs de l'étude

### 2.1. Contexte et constats

En matière de conception bioclimatique et de performance énergétique, à Mayotte, le seul référentiel à disposition des concepteurs est le guide MayEnergie. Son utilisation est basée sur l'application d'une démarche prescriptive élaboré en 2009 puis mis à jour en 2013. Lorsqu'il est appliqué, **le référentiel MayEnergie est performant pour atteindre un confort thermique satisfaisant et limiter de consommations énergétiques**, il présente néanmoins quelques limites :

- Les prescriptions MayEnergies étant génériques : les prescriptions sont identiques pour un logement occupé jour et nuit, un local à faible densité d'occupation et diurne (bureau individuel) et pour un local à forte densité d'occupation (salle de réunion)
- Les prescriptions sont données indépendamment du mode de traitement d'air du local (mixte, climatisation, passif).
- Il ne prend donc pas en compte les évolutions récentes du climat et encore moins celles à venir. En effet, compte tenu de **l'évolution future du climat mahorais**, le confort passif sera de plus en plus difficile à atteindre (voir *Livable CLIMAT*). En réponse, une utilisation plus importante de la climatisation peut se produire dans le futur : un fonctionnement toute l'année dans les locaux initialement mixtes ; l'ajout de climatiseur dans les locaux initialement passifs. Si un bâtiment conçu initialement pour fonctionner de manière passive est climatisé, des pertes thermiques peuvent alors se produire.
- Les prescriptions sont basées sur l'analyse des données climatiques issues de la seule station météo de l'île, non représentative des micros climats.

### 2.2. Objectifs

Dans le but principal d'apporter des réponses aux problématiques exposées en partie 2.1, cette étude s'appuie sur les simulations thermiques dynamiques afin **d'apporter des éléments complémentaires** intégrant les évolutions du climat ainsi que l'usage des locaux. Les objectifs de l'étude sont les suivants :

- 1) Étudier **l'influence des paramètres de conception architecturale** de base et le poids de chacun dans l'atteinte du confort.
- 2) Etudier **l'évolution des comportements thermiques** des bâtiments mahorais en intégrant la **problématique du changement climatique**.
- 3) Mettre en évidence des **conceptions performantes** en cas de climatisation des locaux, pour des usages et modes constructifs différents.
- 4) Apporter un regard critique sur les conclusions par une application de cas et évaluer les **économies d'énergies potentielles**.

# 3. Méthodologie



La méthodologie mise en œuvre se compose de quatre étapes :

- Simulations Thermiques Dynamiques paramétriques simplifiées (réponse aux objectifs 1 et 2)
- Etude de sensibilité des paramètres bioclimatiques à horizon 2070 (réponse aux objectifs 1 et 2)
- Etude de 9 conceptions types - Simulations Thermiques Dynamiques non paramétriques détaillées (réponse aux objectifs 2 et 3)
- Application sur un cas concret : Simulation Thermique dynamique non paramétrique détaillée (réponse à l'objectif 4)

Etape	Simulations	Objectifs
1	Simulations thermiques dynamiques paramétriques simplifiées	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avoir une <b>première approche simplifiée</b> sur le comportement thermique des bâtiments en 2025 et à horizon 2070 et l'influence des choix de conception.</li> <li>• <i>Les taux de renouvellement d'air considérés sont imposés.</i></li> </ul>
2	Etude de sensibilité des paramètres bioclimatiques à horizon 2025 et 2070	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Donner, pour chaque paramètre de conception bioclimatique étudié, des <b>ordres de grandeur</b> de leur impact sur le confort thermique et sur les consommations de climatisation à <b>horizon 2070</b>.</li> </ul>
3	Etude de 9 conceptions - Simulations thermiques dynamiques détaillées	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etudier le comportement thermique de <b>9 conceptions types</b> et l'impact du changement climatique sur celles-ci.</li> <li>• <i>Cette étude intègre des taux de renouvellement d'air dynamiques et différents usages du local.</i></li> </ul>
4	Application sur un cas concret	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour un <b>cas concret</b>, étudier le confort thermique et les consommations d'énergie en 2025 et 2070.</li> <li>• Sur la base des études précédentes et de la campagne de mesure, proposer des solutions d'optimisation.</li> </ul>



### Synthèse de la méthodologie



## 3.1. Étape 1: Simulations thermiques dynamiques paramétriques simplifiées

Le comportement thermique d'un bâtiment résulte d'un ensemble de phénomènes physiques complexes. Cette complexité s'explique non seulement par la diversité des mécanismes en jeu, mais aussi par l'interaction croisée de nombreux paramètres de conception. Ces interactions peuvent parfois être contradictoires, nécessitant alors des arbitrages.

Les **simulations thermiques dynamiques paramétriques** nous permettent d'avoir, pour un cas simple, **une première approche sur l'influence des choix de conception sur la performance thermique des bâtiments en 2025 et en 2070**. Ce type de simulation consiste à faire varier de manière systématique un ou plusieurs paramètres

d'un bâtiment pour évaluer leur impact sur le comportement thermique et énergétique. Ce type de simulation permet d'explorer un **grand nombre de configurations possibles et d'identifier les leviers de performance les plus efficaces en fonction des objectifs recherchés**. En effet, l'influence croisée de certains paramètres peut avoir des effets contraires et des compromis sont parfois nécessaires.

Les simulations thermiques dynamiques paramétriques sont réalisées pour un fonctionnement en mode passif (ventilation naturelle) et en mode actif (climatisation) et selon deux fichiers météo (actuel et 2070-RCP 4.5). Les paramètres ayant fait l'objet d'une paramétrisation sont :

- Fonctionnement passif :
  - Porosité Est/Ouest/Nord/Sud
  - Isolation des murs
  - Niveau de protection solaire
  - Débit de renouvellement d'air
- Fonctionnement actif :
  - Porosité Est/Ouest/Nord/Sud
  - Isolation des murs
  - Niveau de protection solaire

Les figures ci-après présentent les simulations paramétriques associées aux deux modes de traitement de l'air :

- Mode actif (Climatisation)
- Mode passif (Ventilation naturelle)

Les simulations thermiques dynamiques des fonctionnements en mode actif et en mode passif sont réalisées pour trois principes constructifs pour les murs extérieurs :

- Béton
- Brique de Terre Crue (BTC)
- Mur à ossature bois (MOB)

Les simulations thermiques dynamiques paramétriques sont réalisées en utilisant les outils suivants :

- Outils CAD : Rhino 3D 7
- Moteur de calcul STD : Energy +
- Outil STD : LadyBugTools (plug in Grasshopper)
- Outil paramétrisation : Colibri (plug in Grasshopper)

LadyBugTools est un plug in pour Grasshopper, lui-même un environnement de programmation visuelle intégrée à Rhino 3D. Il permet de réaliser des simulations thermiques dynamiques en s'appuyant sur le moteur de calcul Energy+.

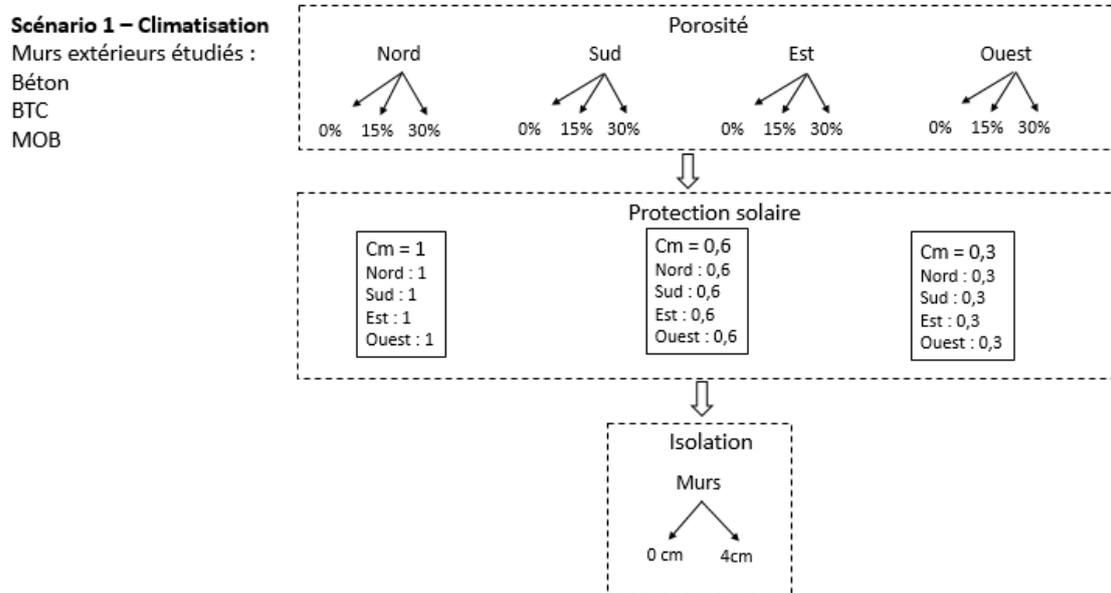
Grâce à son approche visuelle, Grasshopper est particulièrement adapté à la modélisation paramétrique en facilitant la création de scénarios de simulation.

Le plug in Colibri, également intégré à Grasshopper, permet d'automatiser le lancement de simulations paramétriques.

***La réalisation des simulations thermiques dynamiques paramétriques a pour objectif d'avoir une première approche sur le comportement thermique des bâtiments en 2025 et à horizon 2070 ainsi que l'influence des paramètres de conception bioclimatique.***

### 3.1.1. Paramétrisation : Mode actif

L'étude paramétrique associée au mode de fonctionnement actif est présentée dans la figure suivante :

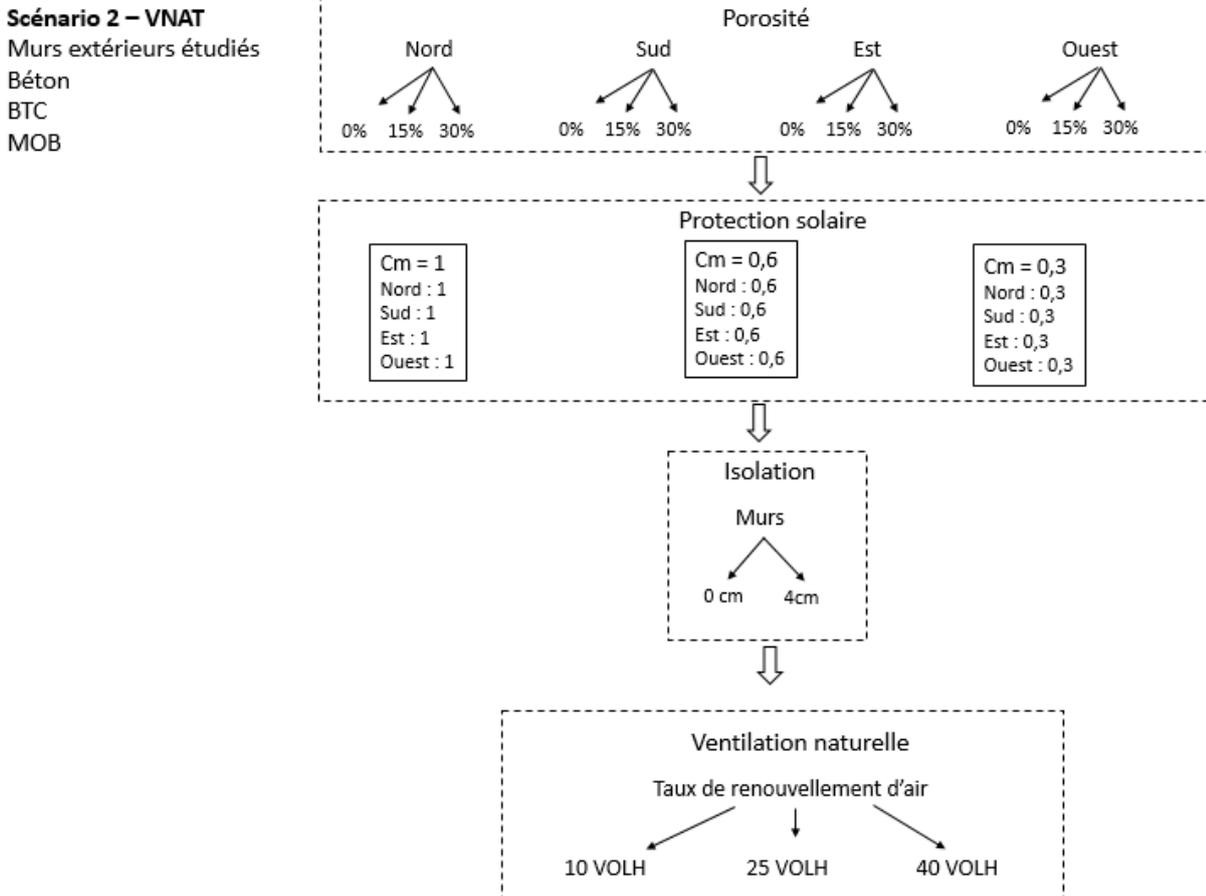


Le nombre de simulations associé à cette étude paramétrique est de 486.

La variable étudiée pour juger la performance de la conception considérée est le **besoin de climatisation surfacique** (kWh/m<sup>2</sup>).

### 3.1.2. Paramétrisation : Mode passif

L'étude paramétrique associée au mode de fonctionnement passif est présentée dans la figure suivante :



Le nombre de simulations associé à cette étude paramétrique est de 1944.

La variable étudiée pour juger la performance de la conception considérée est la **Température opérative moyenne sur la journée la plus chaude (°C)**.

## 3.2. Etape 2 : Etude de sensibilité des paramètres bioclimatiques à horizon 2070

Afin d'étudier de manière plus précise la sensibilité de chaque paramètre vis-à-vis du changement climatique, nous avons étudié, pour 3 usages différents (salle de classe, bureau individuel et open-space), l'influence des paramètres ci-dessous sur la performance thermique des bâtiments mahorais. Ces simulations sont réalisées pour le climat en 2025 et à l'horizon 2070.

Paramètres	Base	Variantes	
Principe constructif	Béton	MOB	
		BTC	
Protections solaires – Facteurs solaires des parois	Cm=0,3	Cm=0,6	
		Cm=0,1	
Isolation des murs	Sans	4 cm d'isolation (R=1,12 m <sup>2</sup> K/W)	
Bardage ventilé	Sans	Avec	
Coefficient d'absorption des murs ( $\alpha$ )	0,6	0,4	
		0,8	
Porosité et orientation	25% Nord et Sud	Nord	0
		Sud	15
		Est	30
		Sud	

Les paramètres étudiés sont **les besoins de climatisation annuels (mode actif) et la température opérative moyenne annuelle (mode passif)** sur les heures d'occupation.

**L'objectif de cette étude est de donner des ordres de grandeur de l'évolution de l'influence de chaque paramètre à horizon 2070 en mode actif et passif.**

Le logiciel de modélisation géométrique utilisé est *Rhino3D Version 7*. Il permet l'export du fichier 3D en GBXML et l'import sur le logiciel de simulation thermique dynamique.

Le logiciel de simulation utilisé est *IES Virtual Environment Version 2025 0.0.0*. Il intègre les caractéristiques suivantes :

- SunCast : Étude d'ombrages (masque environnant et protections solaires) et calcul des gains solaires associés
- Apache : Bilan de consommation dynamique, gains thermiques associés aux fonctionnements du bâtiment, dimensionnement des systèmes et consommation associés,
- MacroFlo : Modélisation de la ventilation naturelle et des mouvements convectifs inter zone au sein d'un bâtiment basé sur les équations de conservation de la masse.
- VistaPro : analyse et visualisation détaillée des résultats (températures, charges, bilans énergétiques et confort).

L'utilisation d'IESVE dans cette étape permet de confirmer les tendances observées lors des STD simplifiées de l'étape 3.1 (réalisées avec LadyBugTools/Energy+), tout en analysant plus finement l'influence de chaque paramètre.

## 3.3. Étape 3: Etude de 9 conceptions - simulations thermiques dynamiques détaillées

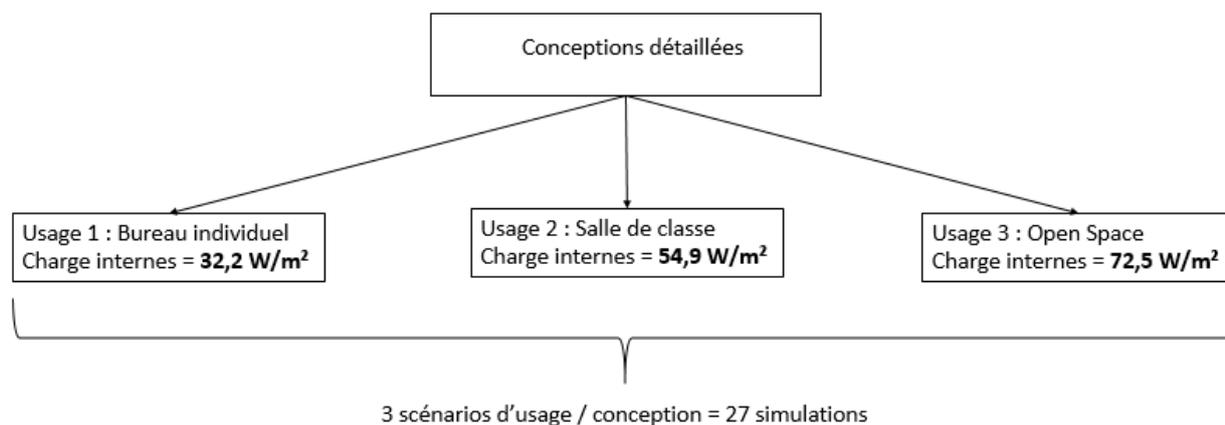
À partir des résultats de la simulation thermique dynamique paramétrique et de l'étude de sensibilité, neuf conceptions aux performances différentes sont retenues afin d'étudier l'influence croisée des paramètres de conception. Les conceptions retenues sont modélisées et simulées de façon plus détaillée pour permettre une étude précise des résultats et afin d'intégrer un calcul dynamique des taux de ventilation naturelle. Les trois principes constructifs sont déclinés en trois conceptions différentes, représentative de ce qui peut être observé à Mayotte. Ces conceptions sont plus ou moins éloignées d'une conception type bioclimatique actuelle, l'objectif étant de regarder l'évolution des performances à horizon 2070.

Le logiciel de modélisation géométrique utilisé est *Rhino3D Version 7*. Le logiciel de simulation utilisé est *IES Virtual Environment Version 2025 0.0.0*.

### 3.3.1. Mode actif

Dans l'objectif de mettre en évidence les conceptions les plus performantes correspondant à chaque usage, l'influence des usages, par modification des charges internes, est étudiée pour chaque conception et principe constructif. Trois usages par conception sont étudiés pour un total de 27 simulations :

- Bureau individuel
- Salle de classe
- Open Space



Pour chaque scénario, le besoin annuel de climatisation est étudié. La performance d'une conception est jugée par la comparaison de ses besoins de climatisation en 2070.

### 3.3.2. Mode passif

Bien que l'étude porte sur l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments en réponse à une probable hausse de l'utilisation de la climatisation du fait du changement climatique, le comportement thermique en mode passif des conceptions simulé est aussi étudié. En effet, l'analyse du climat réalisée dans le

livrable 2 - CLIMAT montre que les conditions favorables à l'atteinte passive du confort sont moins fréquentes, mais existent malgré tout (67,6% du temps pour un horaire de bureaux, entre 7h et 17h en 2070 pour la zone de vitesse 1,5 m/s, scénario RCP 4.5). Ainsi, pour chaque simulation, les taux de confort annuels sont étudiés.

Contrairement à la simulation thermique dynamique paramétrique où les taux de renouvellement d'air sont constants, ils sont ici calculés de façon dynamique selon un modèle « d'enveloppe à perméabilité répartie ».

Ce modèle prend en compte :

- La taille des ouvrants
- Les pertes de charge des ouvrants
- L'exposition au vent de l'ouvrant
- Les vitesses et directions de vent extérieur

Alors que, dans les simulations thermiques dynamiques paramétriques, les températures opératives étaient retenues pour caractériser le confort, les taux de confort selon Givoni sont ici étudiés. Ils sont une manière plus précise de caractériser le confort car ils prennent en compte les vitesses d'air et l'humidité relative. **Les taux de confort des conceptions** seront étudiés en 2025 et en 2070.

### 3.3.3. Comparaison des performances actuelles et futures

Dans l'objectif d'étudier l'évolution des performances dans le futur, les étapes 1 (mode actif) et 2 (mode passif) sont réalisées dans un premier temps avec le fichier météo correspondant aux données climatiques actuelles et dans un second temps avec le fichier météo correspondant aux données climatiques futures (2070 RCP 4.5). Les évolutions de besoins de climatisation et des taux de confort seront alors comparés.

### 3.3.4. Synthèse

La méthodologie mise en œuvre utilise en données d'entrées les résultats de la simulation thermique dynamique paramétrique (mode actif) à partir desquels 9 conceptions sont retenues. Ces conceptions sont simulées de manière plus détaillée pour :

- Comparer leur besoin de climatisation annuelle
- Étudier le confort intérieur en mode passif

**L'objectif de cette comparaison est de caractériser, pour chaque usage et chaque procédé constructif, la performance globale d'une conception et de mettre en évidence l'importance du compromis à réaliser entre performance énergétique et confort passif.**

## 3.4. Étape 4 : Application de cas

Dans l'objectif d'étudier comment adapter les bâtiments existants au changement climatique, deux bâtiments bioclimatiques sont étudiés :

- **La Technopole de Dembeni** (bâtiment tertiaire comprenant notamment des bureaux individuels et des salles de travail type Open-space)
- **Le collège de Ouangani** (bâtiment d'enseignement comprenant notamment des bureaux individuels, et des salles de classe)

Pour étudier la performance thermique de ces bâtiments, leurs performances face aux changements climatique et les évolutions nécessaires, le mode opératoire suivant est mis en œuvre :

- 1) Modélisation des projets tels que construits,
- 2) Sélection des locaux d'étude,
- 3) Analyse des résultats des consommations énergétiques et du confort thermique des bâtiments tels que construits,
- 4) Proposition d'optimisations pour adapter les bâtiments vis-à-vis du changement climatique, en considérant le retour d'expérience réalisé dans le livrable instrumentation et les conclusions des études de simulation,
- 5) Simulation en mode passif et en mode climatisation en prenant en compte les optimisations proposées,
- 6) Généralisation des résultats : les différences de besoins de climatisation observées sur les locaux étudiés sont généralisées à l'ensemble des locaux présentant les mêmes caractéristiques (usages et orientations), ce qui permet de calculer les économies globales en énergie, en coût annuel (€) et en émissions de CO<sub>2</sub> (kgCO<sub>2</sub>e) à l'échelle du bâtiment.

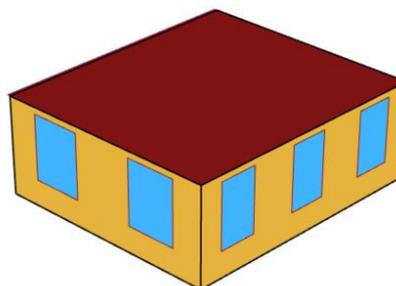
Le logiciel de modélisation géométrique utilisé est *Rhino3D Version 7*. Le logiciel de simulation utilisé est *IES Virtual Environment Version 2025 0.0.0*.

L'usage d'IES-VE, à ce stade, permet de lier la simulation numérique aux données de terrain (plans réels, instrumentation) et d'évaluer l'efficacité des stratégies d'adaptation à l'échelle de bâtiments complets.

# 4. Hypothèses

## 4.1. Géométrie

La géométrie utilisée pour réaliser l'étude paramétrique est volontairement simple. Il s'agit d'une boîte de 7 mètres de largeur, 8 mètres de longueur et 3 mètres de hauteur. Elle peut être assimilée à un bureau de type plateau libre ou à une salle de classe. La figure suivante présente le modèle géométrique utilisé dans l'étude.



## 4.2. Constructions

Dans l'objectif d'étudier l'influence du type de construction et notamment de leur inertie thermique, les simulations thermiques dynamiques paramétriques sont réalisées pour trois procédés constructifs des murs extérieurs :

- Murs en béton
- Murs en Brique de Terre Crue (BTC)
- Murs en ossature bois

Les caractéristiques thermiques des murs extérieurs sont présentées dans les tableaux ci-dessous :

Mur extérieur - Béton (alpha = 0.6)

Matériaux ( ext -> int)	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique (J/kg.K)	Résistance thermique
Béton armé	0,15	1,75	2400	900	0,001
Isolant	Variable car paramétrisation	0,04	30	1000	Variable car paramétrisation
BA 13	0,013	0,25	750	1000	0,004

**Mur extérieur – BTC (alpha = 0.6)**

Matériaux ( ext -> int)	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique (J/kg.K)	Résistance thermique
BTC	0,2	0,8	1900	800	0,003
Isolant	Variable car paramétrisation	0,04	30	1000	Variable car paramétrisation
BA 13	0,013	0,25	750	1000	0,004

**Mur extérieur – MOB (alpha = 0.36)**

Matériaux ( ext -> int)	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique (J/kg.K)	Résistance thermique
OSB	0,012	0,13	650	1700	0,001
Isolant	Variable car paramétrisation	0,04	30	1000	Variable car paramétrisation
BA 13	0,013	0,25	750	1000	0,004

Les caractéristiques thermiques du plancher bas, de la toiture et des vitrages sont présentées ci-dessous. Ces constructions sont communes à l'ensemble des scénarios :

**Plancher bas - Béton**

Matériaux ( ext -> int)	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique (J/kg.K)	Résistance thermique
Béton armé	0,2	1,75	2400	880	0,001

**Toiture – Tôle (alpha = 0.7)**

Matériaux ( ext -> int)	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique (J/kg.K)	Résistance thermique
Tôle	0,002	55	7800	480	0
Isolant	0,08	0,04	30	1000	2
BA 13	0,013	0,25	900	1000	0,004

**Vitrage clair**

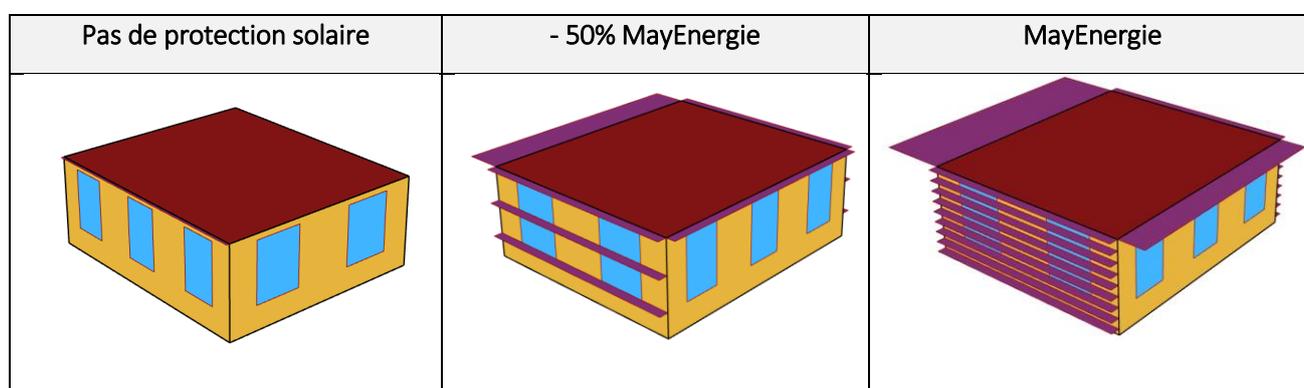
Type de vitrage	Transmission lumineuse	Facteur solaire	Uw (W/m².K)
6mm clair	80%	0,8	5

## 4.3. Protections solaires

Trois scénarios de protection solaires sont étudiés dans l'étude paramétrique :

- Cas 0 : MayEnergie : les façades Est et Ouest sont protégées par des lames type brise-soleils et les façades Nord et Sud par des casquettes. Les dimensions des dispositifs permettent d'atteindre des facteurs solaires de 0,3
- Cas 1 : les façades Est et Ouest sont protégées par des lames et les façades Nord et Sud par des casquettes. Les dimensions des dispositifs permettent d'atteindre des facteurs solaires de 0,6
- Cas 2 : Pas de protection solaire : les façades ne sont pas protégées, le facteur solaire des baies et des murs est de 1

Les figures suivantes illustrent les trois scénarios de protection solaire.



## 4.4. Fonctionnement

### 4.4.1. Ventilation naturelle

Simulations thermiques dynamiques paramétriques : La ventilation naturelle est simulée de manière simplifiée : les taux de renouvellement d'air sont fixés et sont constants pendant la période d'occupation (7h-17h). Trois taux de renouvellement d'air sont étudiés dans l'étude paramétrique : 10 Vol/h, 25 Vol/h et 40 Vol/h.

Simulations thermiques dynamiques détaillées : Les taux de renouvellement d'air naturels sont calculés de façon dynamique selon un modèle « d'enveloppe à perméabilité répartie ».

Ce modèle prend en compte :

- La taille des ouvrants
- Les pertes de charge des ouvrants
- L'exposition au vent de l'ouvrant
- Les vitesses et directions de vent extérieur

## 4.4.2. Climatisation

Le mode de fonctionnement actif correspond aux hypothèses suivantes :

- Débit hygiénique : 25 m<sup>3</sup>/h.pers – activé de 7h à 17h
- Température de consigne : 26°C – 7h à 17h

## 4.4.3. Planning et apports internes

	Planning	Local simplifié	Bureau individuel	Salle de classe	Open-space
Occupation	Lun-Ven : 7h à 17h	13m <sup>2</sup> /pers Sensible : 90 W/pers Latent : 60 W/pers	10 m <sup>2</sup> /pers Sensible : 90 W/pers Latent : 60 W/pers	1 m <sup>2</sup> /pers Sensible : 40 W/pers Latent : 30 W/pers	5 m <sup>2</sup> /pers Sensible : 90 W/pers Latent : 60 W/pers
Luminaire		6 W/m <sup>2</sup>	6 W/m <sup>2</sup>	6 W/m <sup>2</sup>	6 W/m <sup>2</sup>
Bureautique		17,2 W/m <sup>2</sup>	10,7 W/m <sup>2</sup>	2,4 W/m <sup>2</sup>	42 W/m <sup>2</sup>
Brasseur d'air				6,5 W/m <sup>2</sup>	6,5 W/m <sup>2</sup>
Total			30 W/m <sup>2</sup>	32,2 W/m <sup>2</sup>	54,9 W/m <sup>2</sup>

# 5. Limite de la méthodologie et des hypothèses de modélisation

La méthodologie mise en œuvre dans l'étape 1 a pour objectif d'analyser l'influence des choix de conception sur les besoins de climatisation et la température opérative. L'étude s'appuie sur un cas simplifié, élaboré selon une approche conceptuelle. Cette démarche, associée à des hypothèses simplificatrices, présente toutefois certaines limites, détaillées ci-après :

- 1) La forme du local étudié est simple et est assimilable à une boîte de 7 mètres par 8 mètres. Avec la toiture, 5 façades sont en contact avec l'extérieur. Les gains par conduction peuvent donc être surestimés par rapport à une pièce intégrée dans un bâtiment présenté 2 ou 3 façades en contact avec l'extérieur. Ainsi, l'isolation qui réduit les échanges par conduction peut avoir une influence plus importante par rapport à un cas réel.
- 2) La performance d'une conception passive est évaluée à partir de la température opérative moyenne lors de la journée la plus chaude. Toutefois, le confort thermique dépend également de l'humidité relative et de la vitesse de l'air. Cette dernière étant assurée par des brasseurs d'air, son influence est considérée comme maîtrisée et peut donc être exclue de l'analyse. En revanche, l'humidité relative — influencée par les taux de renouvellement d'air et les charges latentes internes — n'est pas prise en compte. Par conséquent, l'évaluation de la performance d'une conception uniquement à travers la température opérative reste partielle et ne reflète pas l'ensemble des paramètres du confort thermique.
- 3) La performance d'une conception active est évaluée à partir des besoins surfaciques de climatisation, correspondant à l'énergie nécessaire pour maintenir une température d'air intérieur de 26 °C. Cependant, la température réellement perçue par les occupants est la température opérative, qui dépend également de la température radiante. Ainsi, en fonction du niveau de protection solaire ou de l'isolation des façades, la température opérative peut s'avérer supérieure à 26 °C. En pratique, une température radiante trop élevée peut conduire à abaisser la température de consigne de la climatisation, afin que la température opérative respecte le niveau de confort thermique attendu par les occupants.
- 4) Dans les simulations en mode passif, les taux de renouvellement d'air sont supposés constants sur la période d'occupation et ne reflètent pas le caractère fluctuant du vent. De plus, il existe des cas où les taux de renouvellement d'air ne sont pas physiquement réalistes par rapport aux taux de porosité (40 Vol/h pour 0% de porosité par exemple). Ils restent cependant minoritaires par rapport aux cas plausibles et leur influence face aux conclusions est faible.

La méthodologie mise en œuvre lors des **étapes 2,3 et 4**, a permis d'analyser, d'une part, l'influence spécifique des différents paramètres de conceptions sur les besoins en climatisation et le confort thermique et d'autre part, d'étudier l'influence croisée de conceptions, plus ou moins éloignées d'une conception type bioclimatique actuelle, dont l'objectif était de regarder l'évolution des performances à horizon 2070. Et finalement, l'étape 4 a consisté à appliquer les optimisations observées sur deux cas réels, afin d'analyser les impacts de ces dernières en termes de confort thermique, de besoin en climatisation, d'émission de CO<sub>2</sub> et cout annuel en électricité en 2025 et à l'horizon 2070. Ces approches, bien qu'apportant un degré de précision plus élevé que l'étude simplifiée de l'étape 1, ont certaines limites, détaillées ci-après :

- 5) Les simulations restent fondées sur des modèles numériques et intègrent des données météorologiques basées sur la station de Pamandzi. En fonction de la localisation du projet, des différences sur les vents, les températures et l'ensoleillement peuvent être observées. Les simulations n'intègrent pas les phénomènes extrêmes tels que les cyclones.
- 6) Les profils d'occupation et d'utilisation des différents équipements sont standardisés et sont basés sur des valeurs théoriques. Ils ne reflètent donc pas fidèlement les pratiques réelles des usagers, qui peuvent varier d'une salle à l'autre, d'un établissement à l'autre ou selon les saisons, par exemple, ce qui concerne l'ouverture des ouvrants, le réglage des températures de consigne ou encore l'usage des équipements électriques.
- 7) Les taux de renouvellement d'air sont simulés de façon dynamique dans ces étapes. Cependant, ces calculs reposent sur des valeurs de perméabilité et de pertes de charge qui ne reflètent pas toujours la complexité des situations réelles. Le comportement aléatoire des usagers (ouvertures/fermetures des baies) ou certaines conditions locales de vent peuvent induire une surestimation ou une sous-estimation des débits réels, ce qui a un impact direct sur les indicateurs de confort et les consommations de climatisation simulés.
- 8) L'étude du confort thermique se base sur l'analyse de la température opérative et des taux de confort selon le diagramme de Givoni. Des études sur le confort thermique à Mayotte (comme l'étude COCO - Confort Optimisé pour réduire la Climatisation en Outre-mer porté par IMAGEEN en partenariat avec Watt Smart et KEBATI) montre que les contours des zones de confort sur le diagramme de l'air humide peuvent être élargis et que le confort passif peut être atteignable jusque 31°C.
- 9) L'étude porte uniquement sur des locaux fonctionnant en journée. Pour des bâtiments résidentiels avec un usage nocturne, les conclusions peuvent différer (notamment sur l'inertie).
- 10) Nous avons dû limiter le nombre de paramètres étudiés dans nos simulations. D'autres paramètres non étudiés dans l'étude peuvent influencer le confort thermique : l'exposition au vent du site, les masques environnants, la végétalisation...

# 6. Résultats

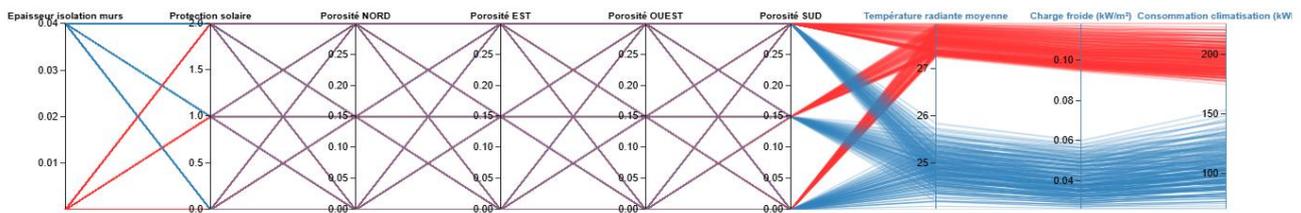
## 6.1. Etape 1 : Simulations thermiques dynamiques paramétriques simplifiées

### 6.1.1. Mode actif

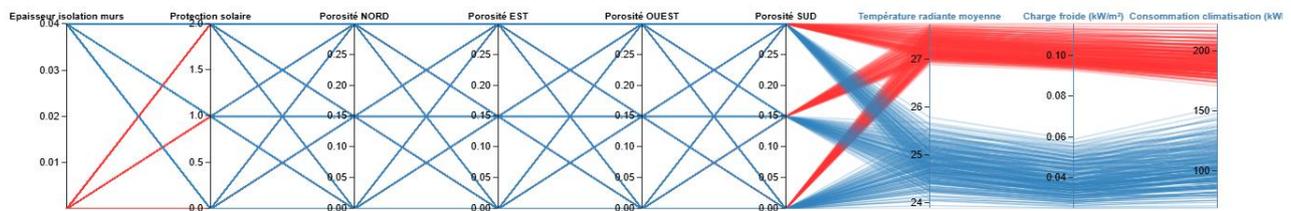
2025

Les résultats de la simulation thermique dynamique peuvent être présentés sous la forme d'un diagramme en coordonnées parallèles. Cet outil permet d'identifier les conceptions correspondant à certains critères de conception ou de performance. La figure suivante présente par exemple le diagramme obtenu par procédés constructifs :

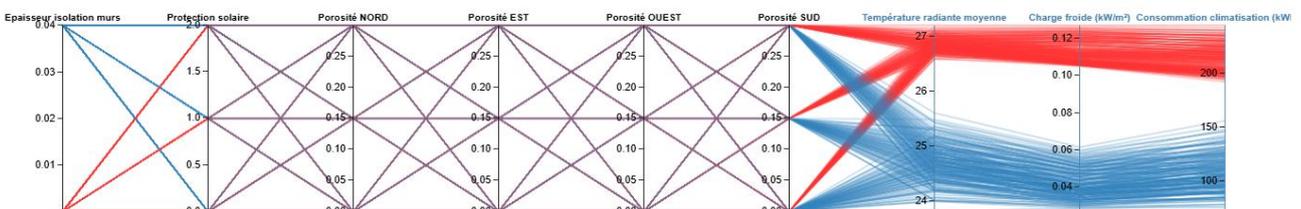
#### Béton



#### BTC



#### MOB



Pour faciliter l'analyse, un diagramme en barre d'intervalle est utilisé. Pour le mode actif, les barres verticales représentent l'intervalle de **besoins de climatisation surfaciques annuels** atteignables pour les différentes configurations.

Les résultats de porosité supposent une même porosité appliquée à l'ensemble des quatre façades.

La conception type Mayenergie correspond au cas suivant :

- Porosité Nord et Sud : 30%
- Porosité Est et Ouest : 0%
- Cm=0.3
- Pas d'isolation en façade.

Mode constructif	Résultats	Besoins de climatisation annuels - Conception type MayEnergie [kWh/m <sup>2</sup> .an]
Béton		185 kWh/m <sup>2</sup>
BTC		198 kWh/m <sup>2</sup>
MOB		201 kWh/m <sup>2</sup>

Légende

	Avec isolation
	Sans isolation
	Niveau MayEnergie



Les graphiques mettent en évidence les points suivants :

● Performance thermique générale :

- **Des écarts importants sont observés entre les conceptions performantes**, où les besoins de climatisation sont inférieurs à 80 kWh/m<sup>2</sup>.an **et conceptions non optimisées**, où les besoins de climatisation peuvent atteindre 250 kWh/m<sup>2</sup>.an) soit **un facteur 3** sur les consommations de climatisation.
- Les conceptions les plus performantes sont :
  - Avec isolation, protections solaires performantes Cm=0,3 et une porosité de 15% sur une façade.  
*Note : en fonction de l'inertie du principe constructif, l'orientation à privilégier peut varier.*
- Les conceptions les moins performantes sont :
  - Sans isolation, sans protection solaire Cm=1 et des façades très poreuses sur à minima 3 orientations.

● Isolation thermique :

L'**absence d'isolation augmente systématiquement le besoin de climatisation**, peu importe les autres paramètres de conception. L'isolation thermique est essentielle pour atteindre des performances thermiques intéressante pour le mode constructif MOB. L'isolation thermique a également un impact sur la température radiante des murs, ainsi, à température de consigne de climatisation égale, les usagers ressentiront une température opérative plus élevée sans isolation, pouvant entraîner des baisses des températures de consigne.

● Protection solaire :

**La performance des protections solaires a un effet significatif sur le besoin de climatisation :**

- Plus la protection solaire est performante, plus le besoin de climatisation diminue
- Cet effet est plus marqué lorsque les murs ne sont pas isolés

● Porosité :

La porosité a également un impact significatif sur le besoin de climatisation :

- Plus la porosité est élevée, plus le besoin de climatisation augmente.
- Cet effet est amplifié lorsque les murs sont isolés

Le besoin de climatisation surfacique annuel, correspondant à une conception type MayEnergie, pour le procédé constructif « béton » est de 185,81 kWh/m<sup>2</sup>.



**Synthèse**

L'influence des paramètres de conception étudiés sur le besoin de climatisation peut être synthétisée comme suit :

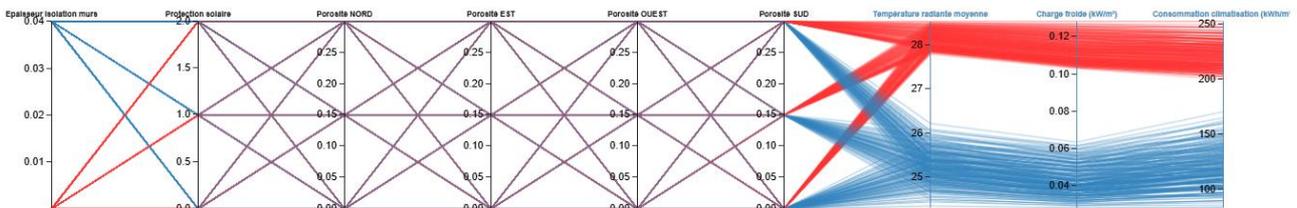
- Les comportements thermiques et les observations sont semblables pour les trois modes constructifs
- L'absence d'isolation thermique entraine systématiquement une surconsommation de climatisation.
- Plus la protection solaire est performante, plus le besoin diminue, surtout en l'absence d'isolation.
- Une porosité élevée augmente le besoin de climatisation.



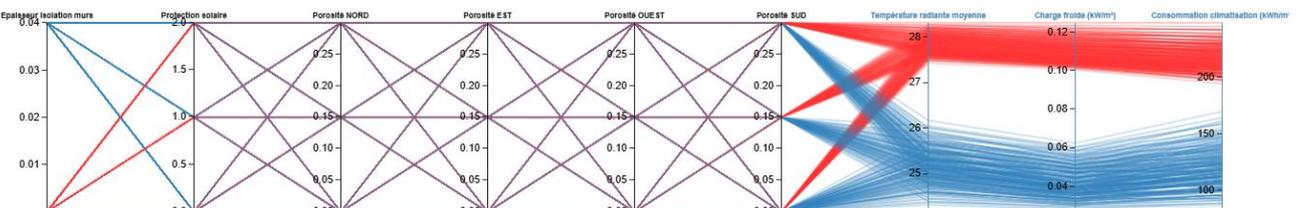
**2070**

Les résultats des simulations à horizon 2070 sont présentés ci-dessous.

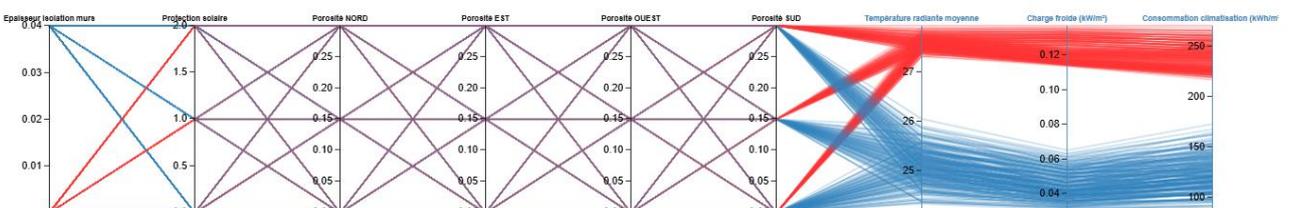
Béton



BTC



MOB



Mode constructif	Résultats	Besoins de climatisation annuels - Conception type MayEnergie [kWh/m <sup>2</sup> .an]
Béton		<p>210,74 kWh/m<sup>2</sup>.an +14% par rapport à 2025</p>
BTC		<p>206,97 kWh/m<sup>2</sup>.an + 12% par rapport à 2025</p>
MOB		<p>226,7 kWh/m<sup>2</sup>.an +12% par rapport à 2025</p>

Légende

- Avec isolation
- Sans isolation
- - - Niveau MayEnergie





### Synthèse

Les écarts de consommation entre la solution la plus performante et la moins performante augmentent en 2070. Cela met en évidence que **l'impact des paramètres de conception sur les besoins de climatisation sera plus important qu'il ne l'est aujourd'hui.**

- Les besoins de climatisation augmenteront même pour les constructions avec une conception bioclimatique performante (environ +12%).
- L'impact de l'isolation sur les consommations énergétiques augmentera en 2070, en particulier pour les conceptions en béton et en MOB.
- La performance des protections solaires jouera également un rôle plus important sur les besoins de climatisation.
- Pour les trois procédés constructifs, l'impact de la porosité est semblable.



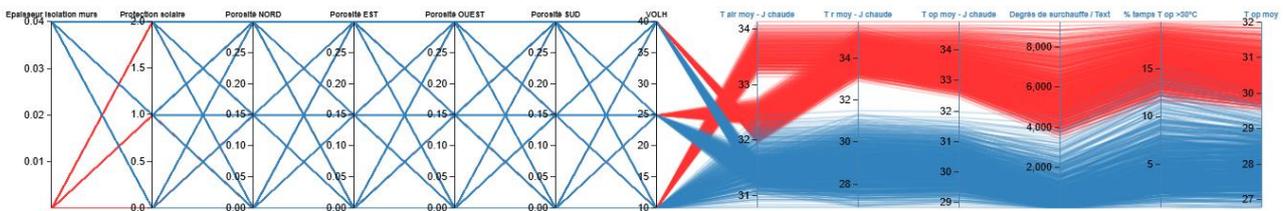
## 6.1.2. Mode passif

Les résultats ci-dessous présentent les résultats des simulations paramétriques simplifiées pour le mode passif.

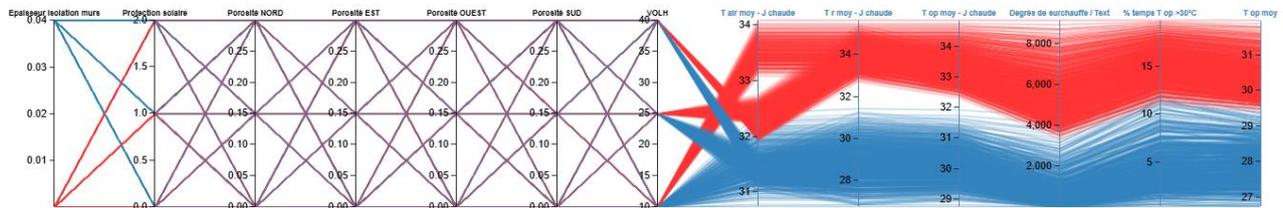
2025

Le diagramme suivant représente les résultats obtenus pour les différents principes constructifs.

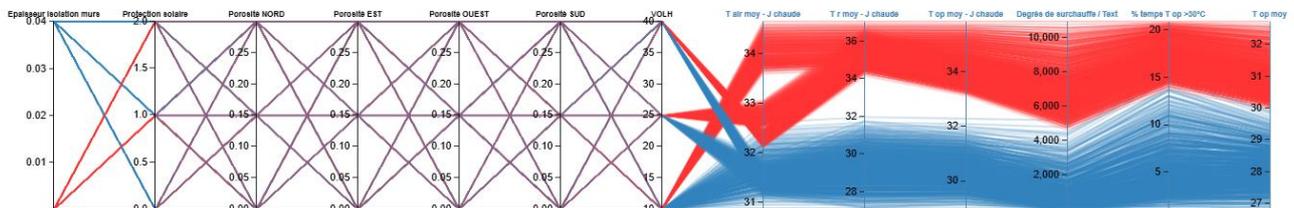
### Béton



### BTC



### MOB



Pour le mode passif, les barres verticales représentent l'intervalle de **température opérative moyenne lors de la journée la plus chaude** atteignable pour les différentes configurations, lorsque le paramètre étudié est maintenu constant. Autrement dit, ce graphique permet de visualiser l'étendue des performances thermiques possibles selon les différentes stratégies passives, lorsque le paramètre en question est maintenu constant.

Modes constructifs	Résultats	Température opérative Moyenne sur la journée la plus chaude [°C] - Conception type MAYERNEGIE
Béton		32,8 °C
BTC		32,7 °C
MOB		33,2 °C



Le graphe met en évidence les points suivants :

- Performance thermique générale :

- Des écarts importants sont observés entre les conceptions, où les températures opératives moyennes lors de la journée la plus chaude peuvent varier de 27°C pour une conception performante à plus de 35°C pour les conceptions non optimisées, soit un écart de plus de 8°C et des conditions thermiques difficilement tenables pour des occupants.
- Les conceptions les plus performantes sont :
  - Avec isolation, protections solaires performantes  $C_m=0,3$ , une porosité de 15% sur deux façades et des taux de renouvellement d'air supérieur à 40VOL/H  
*Note : en pratique, ce cas est peu réaliste : un taux de renouvellement d'air est difficilement atteignable avec un taux de porosité des façades de 15%.*
- Les conceptions les moins performantes sont :
  - Sans isolation, sans protection solaire  $C_m=1$  et des façades très poreuses (30% de porosité) avec des taux de renouvellement d'air très faibles (10 VOL/H).

- Isolation thermique : L'absence d'isolation dégrade systématiquement le confort thermique en augmentant la température opérative.

- Protection solaire :

La performance des protections solaires a un effet significatif sur la température opérative :

- Plus la protection solaire est efficace, plus la température opérative diminue
- Cet effet est plus marqué lorsque les murs ne sont pas isolés
- L'augmentation du niveau de protection solaire verrouille la température opérative

- Porosité et taux de renouvellement d'air :

L'augmentation des taux de renouvellement d'air permet dans la majorité des cas, d'améliorer le confort thermique. Ce phénomène est d'autant plus marqué lorsque le bâtiment n'est pas isolé.

////////////////////////////////////  
**Synthèse**

L'influence des paramètres de conception étudiés sur le confort thermique, évalué par la température opérative lors de la journée la plus chaude, peut être synthétisée comme suit :

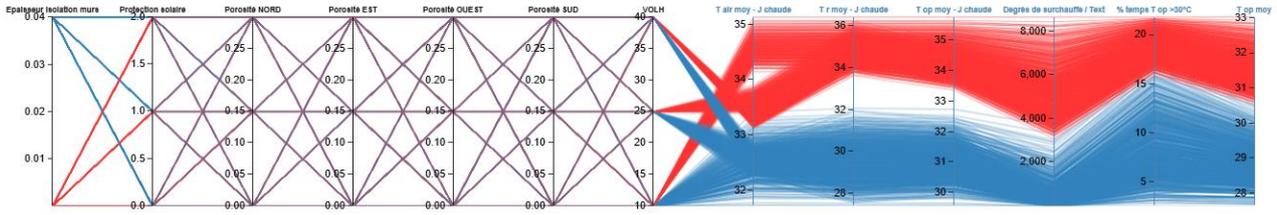
- Les comportements thermiques et les observations sont semblables pour les trois modes constructifs.
- L'absence d'isolation thermique dégrade systématiquement le confort en élevant la température opérative
- Des protections solaires performantes réduisent la température opérative. Plus elles sont performantes plus elles verrouillent la température opérative.

////////////////////////////////////

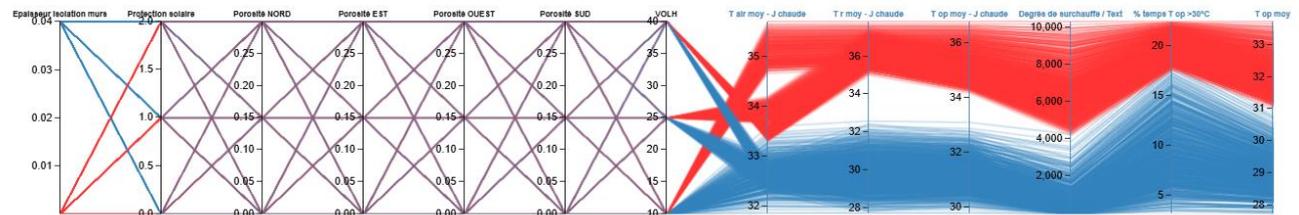
2070

Les résultats des simulations paramétriques à horizon 2070 sont présentés ci-dessous :

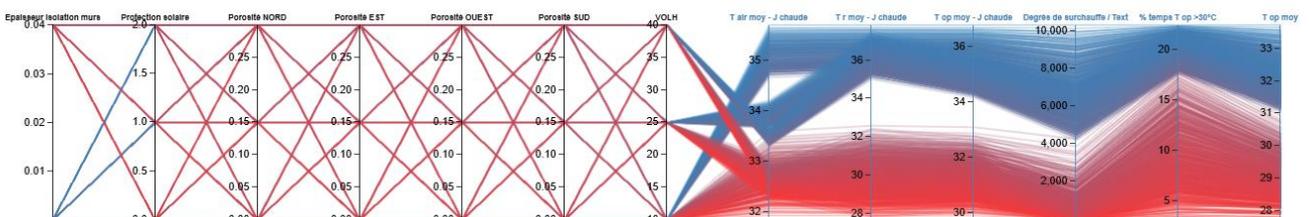
Béton



BTC



MOB



Modes constructifs	Résultats	Température opérative moyenne sur la journée la plus chaude [°C]		
		Conception type MAYERNEGIE 2070	Ecart avec 2025	Cas extrême, température la plus chaude
Béton	<p>Comparaison des stratégies passives sur le confort thermique intérieur</p> <p>Isolation: Cmi = 0, 0.6, 0.3 Porosité: 0%, 15%, 30% Renouvellement air: 10, 25, 40</p>	33,75 °C	+1°C	35,8 °C



<p><b>BTC</b></p>	<p>Comparaison des stratégies passives sur le confort thermique intérieur</p> <p>Température opérative</p> <p>Isolation Protection solaire Porosité Renouvellement air</p>	<p>34,47 °C</p>	<p>+1,7 °C</p>	<p>36,8 °C</p>
<p><b>MOB</b></p>	<p>Comparaison des stratégies passives sur le confort thermique intérieur</p> <p>Température opérative</p> <p>Isolation Protection solaire Porosité Renouvellement air</p>	<p>34,46 °C</p>	<p>+1 °C</p>	<p>36,8 °C</p>

Légende

- Avec isolation
- Sans isolation
- - - Niveau MayEnergie





### Synthèse

- Entre 2025 et 2070, l'**influence des paramètres de conception** sur la température opérative **évolue légèrement à la hausse**, sauf pour certaines exceptions.
- Les températures opératives dans les conceptions **type MayEnergie** augmentent de **0,9 à 1,8 °C**, selon le procédé constructif.
- Dans les **conceptions non performantes**, la température peut atteindre **jusqu'à 36,76 °C**, rendant les locaux **inutilisables** lors des périodes les plus chaudes.



*Ces études nous permettent d'avoir **une première approche sur l'impact des différents paramètres bioclimatiques et du comportement des bâtiments mahorais à horizon 2070**. Afin d'étudier plus précisément la sensibilité de chaque paramètre vis-à-vis des consommations énergétiques et du confort thermique, et de sortir les cas irréalistes de nos études, une étude de sensibilité a été réalisée.*



## 6.2. Etape 2 : Etude de sensibilité des paramètres bioclimatiques à horizon 2070

Afin d'étudier de manière plus précise la sensibilité de chaque paramètre vis-à-vis du changement climatique, nous avons étudié pour 3 usages différents (salle de classe, bureau individuel et open-space), l'influence des paramètres ci-dessous sur la performance thermique des bâtiments mahorais. Ces simulations sont réalisées pour le climat en 2025 et à l'horizon 2070.

Le cas initial est le suivant :

Paramètres	Base
Principe constructif	Béton
Protections solaires – Facteurs solaires des parois	Cm=0,3
Isolation des murs	Sans
Bardage ventilé	Sans
Coefficient d'absorption des murs ( $\alpha$ )	0,6
Porosité et orientation	25% Nord et Sud

Les résultats présentés ci-dessous mettent en évidence l'influence de chaque paramètre, simulée dans le climat actuel et à l'horizon 2070. Ils sont exprimés en pourcentage et permettent d'identifier si le paramètre considéré induit une réduction ou une augmentation des besoins en climatisation (mode actif) ainsi que de la température opérative moyenne (mode passif).

## 6.2.1 Mode actif

2025

Besoin de Climatisation annuel	Usage	Paramètres																			
		MOB	BTC	Cm 0,6	Cm 1	Isolation Acrm	Bardage ventilé	Abs 0,4	Abs 0,8	Exposition E/O	Porosité 15 N/S	Porosité 15 N	Porosité 15 S	Porosité 30 N	Porosité 30 S	Porosité 15 E/O	Porosité 15 E	Porosité 15 O	Porosité 30 E/O	Porosité 30 E	Porosité 30 O
Classe		5%	-2%	2%	7%	-4%	-2%	-2%	2%	3%	-3%	-4%	-4%	-2%	-3%	0%	-2%	-2%	3%	0%	0%
Bureau		13%	-5%	4%	13%	-8%	-4%	-6%	6%	5%	-4%	-6%	-7%	-3%	-5%	-1%	-4%	-4%	5%	-1%	-1%
OS		6%	-4%	2%	6%	-4%	-2%	-3%	3%	4%	-4%	-5%	-6%	-3%	-4%	-1%	-3%	-3%	4%	0%	-1%

2070

Besoin de Climatisation annuel	Usage	Paramètres																			
		MOB	BTC	Cm 0,6	Cm 1	Isolation Acrm	Bardage ventilé	Abs 0,4	Abs 0,8	Exposition E/O	Porosité 15 N/S	Porosité 15 N	Porosité 15 S	Porosité 30 N	Porosité 30 S	Porosité 15 E/O	Porosité 15 E	Porosité 15 O	Porosité 30 E/O	Porosité 30 E	Porosité 30 O
Classe		3%	-2%	2%	6%	-4%	-1%	-2%	2%	3%	-2%	-3%	-3%	-2%	-3%	-1%	-2%	-2%	2%	-1%	-1%
Bureau		9%	-5%	3%	11%	-11%	-3%	-5%	5%	5%	-4%	-5%	-6%	-3%	-4%	-2%	-4%	-5%	3%	-2%	-2%
OS		5%	-4%	1%	5%	-5%	-2%	-2%	2%	4%	-3%	-4%	-5%	-2%	-4%	-2%	-4%	-4%	2%	-2%	-2%

Les résultats mettent en évidence les points suivants :

- Performance thermique générale : l'influence des paramètres est plus marquée dans les usages à faibles charges internes, comme les bureaux. À l'inverse, plus les gains internes sont importants (salles de classe, open-spaces), plus ils réduisent l'impact des paramètres, dont l'influence se trouve atténuée.
- Isolation thermique : l'ajout d'une isolation permet une réduction des besoins en froid, en limitant plus efficacement que les autres paramètres les transferts de chaleur par conduction à travers les parois, favorable à un fonctionnement en mode mixte. L'intégration d'un bardage ventilé permet également de réduire les besoins en froid. À l'horizon 2070, son influence reste sensiblement similaire à celle observée dans le climat actuel.
- Principe constructif : Une structure de type MOB tend à augmenter les besoins en froid, sa faible inertie, comparé au béton et BTC, la rendant plus sensible et réactive aux apports solaires. La structure en BTC réagit mieux au climat tropical humide que le béton, permettant une réduction des besoins en climatisation.
- Protection solaire : Une protection solaire performante est essentielle pour limiter les besoins en climatisation. Les variantes avec des protections moins efficaces (FS vitrage = 0,6 ou 1) entraînent une augmentation significative des besoins en froid, directement liée à l'augmentation des apports solaires.
- Coefficient d'absorption : Les parois avec une teinte claire ( $\alpha = 0,4$ ) réfléchissent une grande partie du rayonnement solaire, limitant l'échauffement des parois et les transferts de chaleur vers l'intérieur, réduisant ainsi les besoins en climatisation. À l'inverse, les parois plus foncées ( $\alpha = 0,6$  et  $\alpha = 0,8$ ) absorbent davantage de chaleur, ce qui augmente les besoins en climatisation.

- **Exposition :** Une exposition Est/Ouest des façades principales entraîne plus d'apports solaires directs, en début et fin de journée, et augmente les besoins en climatisation.
- **Porosité :** En mode actif, une faible porosité permet de réduire les besoins froids, contrairement à une porosité plus importante, qui augmente les apports solaires, et en conséquence augmente les besoins en climatisation.

## 6.2.2 Mode passif

2025

T° opérative Moyenne - Heure d'occupation	Usage	Usage																			
		MOB	BTC	Cm 0,6	Cm 1	Isolation 4cm	Bardage ventilé	Abs 0,4	Abs 0,8	Exposition E/O	Porosité 15 N/S	Porosité 15 N	Porosité 15 S	Porosité 30 N	Porosité 30 S	Porosité 15 E/O	Porosité 15 E	Porosité 15 O	Porosité 30 E/O	Porosité 30 E	Porosité 30 O
Classe		2%	0%	0%	2%	0%	0%	-1%	1%	1%	0%	3%	3%	2%	2%	1%	4%	3%	1%	2%	2%
Bureau		2%	0%	1%	2%	1%	-1%	-1%	1%	1%	0%	2%	2%	2%	1%	1%	3%	3%	0%	2%	2%
OS		2%	0%	-1%	0%	0%	0%	-1%	1%	1%	0%	3%	3%	2%	2%	1%	4%	3%	0%	2%	2%

2070

T° opérative Moyenne - Heure d'occupation	Usage	Usage																			
		MOB	BTC	Cm 0,6	Cm 1	Isolation 4cm	Bardage ventilé	Abs 0,4	Abs 0,8	Exposition E/O	Porosité 15 N/S	Porosité 15 N	Porosité 15 S	Porosité 30 N	Porosité 30 S	Porosité 15 E/O	Porosité 15 E	Porosité 15 O	Porosité 30 E/O	Porosité 30 E	Porosité 30 O
Classe		2%	0%	1%	2%	0%	0%	-1%	1%	1%	0%	3%	2%	2%	2%	0%	3%	3%	1%	3%	2%
Bureau		2%	0%	1%	2%	1%	-1%	-1%	1%	1%	0%	2%	2%	2%	1%	0%	2%	2%	1%	2%	2%
OS		2%	0%	0%	1%	0%	0%	-1%	1%	1%	0%	3%	3%	2%	2%	0%	2%	2%	1%	3%	3%

Les résultats mettent en évidence les points suivants :

- **Performance thermique générale :** Contrairement au mode actif, l'usage ne semble pas avoir d'influence notable en mode passif : l'influence des paramètres restent globalement similaires entre les différents types d'usage. L'influence des paramètres est sensiblement la même à l'horizon 2070.
- **Isolation thermique :** l'ajout d'une isolation sur le cas initial ne suffit pas à réduire significativement la température opérative moyenne, sans toutefois l'augmenter.  
*Note : Par rapport aux études précédentes, l'isolation a une influence plus modérée sur le confort thermique. En effet, l'isolation permet de limiter les surchauffes lors des jours les plus chauds, mais elle limite également l'évacuation des gains internes lors des périodes plus fraîches. Ainsi, en étudiant la température opérative sur l'ensemble de l'année, l'impact de l'isolation sur le confort thermique est plus limité.*
- **Principe constructif :** le MOB induit une élévation de la température opérative plus rapide, en raison de sa faible inertie, comparé à celle du BTC, dont le comportement se rapproche de celui du béton et n'exerce pas d'influence significative sur l'évolution de la température opérative.  
*Note : Nous étudions ici, la température opérative, les propriétés de régulation de l'hygrométrie de la BTC sur les taux d'humidité ambiants et donc du confort thermique ne sont donc pas considérées.*

- **Protection solaire** : le facteur solaire reste déterminant : une protection efficace (FS vitrage= 0,3) permet de limiter l'échauffement intérieur. À l'inverse, une protection solaire insuffisante (FS vitrage = 0,6 ou 1) accroît la température opérative, aggravant l'inconfort des occupants.
- **Coefficient d'absorption** : en mode passif, des parois à teinte claires ( $\alpha = 0,4$ ) favorisent un meilleur confort en limitant l'échauffement intérieur, tandis que des parois plus foncées ( $\alpha = 0,8$  et  $\alpha = 0,8$ ) accentuent les risques de surchauffes et augmentent l'inconfort thermique.
- **Exposition** : une orientation Est/Ouest des façades principales reste défavorable en mode passif, car elle expose davantage aux apports solaires en début et fin de journée, augmentant ainsi les températures opératives.
- **Porosité** : en mode passif, une faible porosité ne permet pas une ventilation naturelle efficace, qui limite l'évacuation de la chaleur. Une porosité répartie sur deux façades opposées est plus favorable, facilitant un renouvellement d'air plus efficace, réduisant la température opérative. Contrairement aux observations faites lors de l'étape 1, l'augmentation de la porosité entraîne ici une diminution de la température opérative. Cela s'explique par le fait que, dans cette étude de sensibilité, c'est la moyenne annuelle de la température opérative qui est prise en compte, et que les fortes porosités sont associées à une protection solaire déjà efficace dans le cas de base ( $C_m=0,3$ ).

////////////////////////////////////

## Synthèse

- L'isolation, les protections solaires, et la gestion de la porosité sont les paramètres les plus influant, autant dans le climat actuel, qu'à l'horizon 2070,
- En mode actif, l'isolation, les protections solaires performantes et une faible porosité réduisent de manières non négligeable les besoins en climatisation,
- En mode passif, le confort thermique dépend surtout de la maîtrise des apport solaires (protection solaire performante, teinte des parois) et d'une ventilation naturelle favorisée par une porosité sur deux façades opposées.

////////////////////////////////////

*Ces deux premières étapes ont permis d'identifier les paramètres les plus influents sur le confort thermique et les besoins en climatisation, ainsi que de dégager les tendances générales dans le climat actuel et à l'horizon 2070. Afin d'aller plus loin et d'évaluer le comportement croisé de ces paramètres, des simulations thermiques dynamiques détaillées ont été réalisées.*



## 6.3. Etape 3: Etude de 9 conceptions - Simulations thermiques dynamiques détaillées

Sur la base des deux études précédentes, et afin d'étudier de manière plus précise le comportement croisé des paramètres de conception bioclimatiques, des simulations thermiques dynamiques détaillées sur 9 cas types ont été réalisées. Celles-ci représentent 9 principes de conception, se rapprochant plus ou moins des conceptions bioclimatiques actuelles.

### 6.3.1 Scénarios étudiés

Les scénarios retenus à l'issue de la simulation paramétrique simplifiée (mode actif) sont présentés dans cette partie.

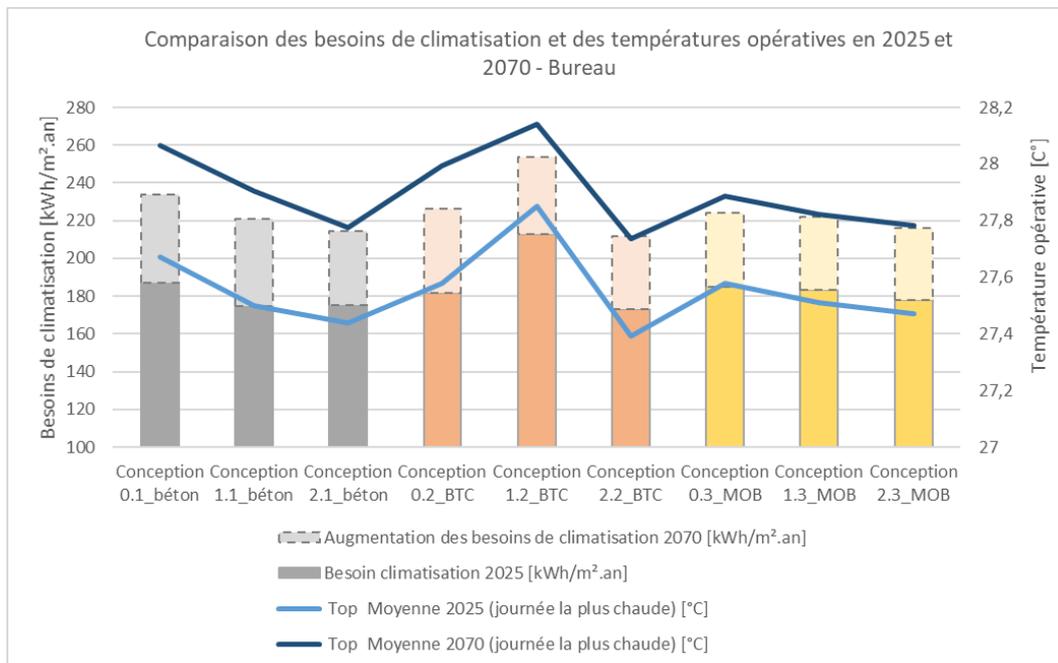
- Conception 0.1 Béton
  - Isolation des murs : 0 cm
  - Protection solaire :  $C_m = 0,3$
  - Porosité Nord, Sud : 30%
  - Porosité Est, Ouest : 0%
- Conception 1.1 BETON :
  - Isolation des murs : 0 cm
  - Protection solaire :  $C_m = 0,3$
  - Porosité Nord 15%
  - Porosité Est, Sud, Ouest : 0%
- Conception 2.1 BETON :
  - Isolation des murs : 4 cm
  - Protection solaire : Pas de protection solaire
  - Porosité Sud : 30%
  - Porosité Nord, Est, Ouest : 0%
- Conception 0.2 BTC
  - Isolation des murs : 0 cm
  - Protection solaire :  $C_m = 0,3$
  - Porosité Nord, Sud : 30%
  - Porosité Est, Ouest : 0%
- Conception 1.2 BTC :
  - Isolation des murs : 4 cm
  - Pas de protection solaire
  - Porosité Nord, Sud, Ouest : 30%
  - Porosité Est : 0%
- Conception 2.2 BTC :  
(Besoin surfacique de froid = 86,05 kWh/m<sup>2</sup>)
  - Isolation des murs : 4cm
  - Protection solaire :  $C_m = 0,6$
  - Porosité Nord, Sud = 0,15%
  - Porosité Est, Ouest = 0%

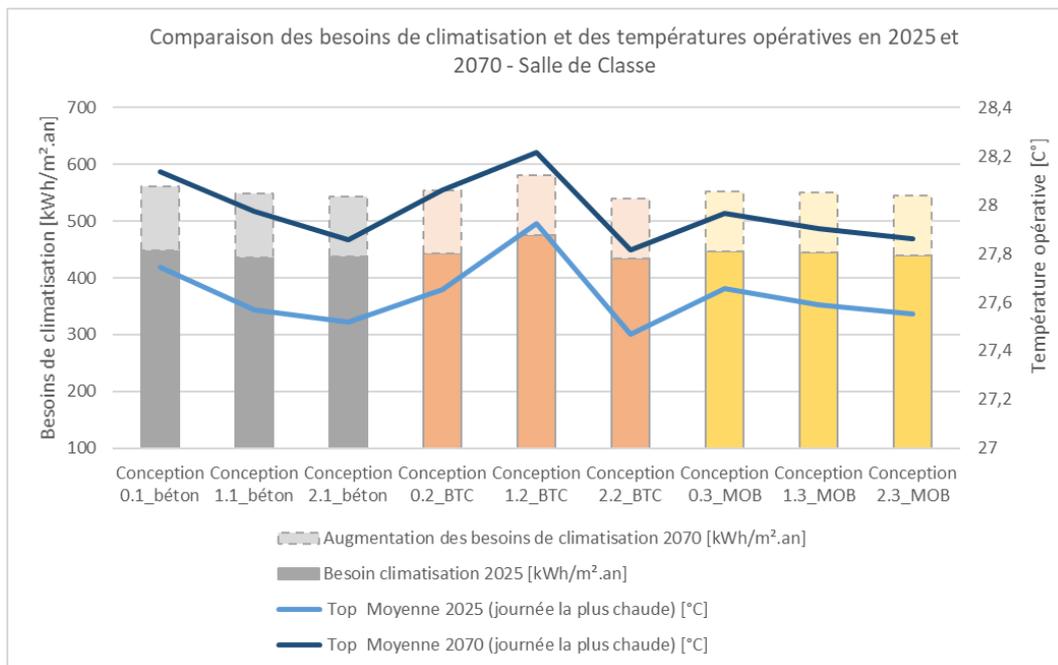
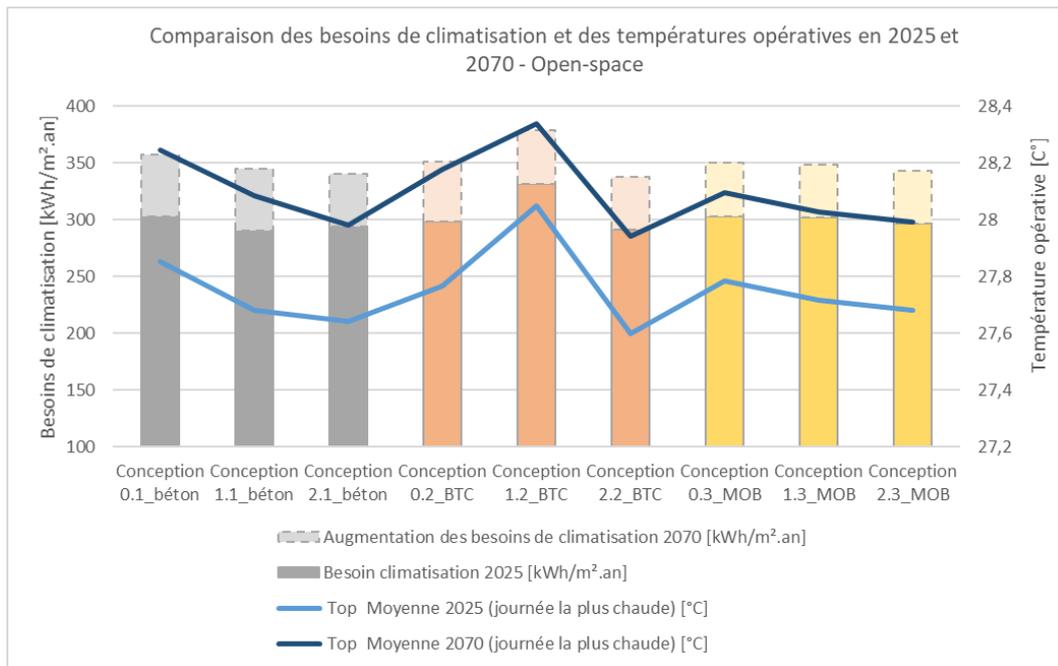
- Conception 0.3 MOB
  - Isolation des murs : 0 cm
  - Protection solaire : Cm = 0,3
  - Porosité Nord, Sud : 30%
  - Porosité Est, Ouest : 0%
- Conception 1.3 MOB
  - Isolation des murs : 0 cm
  - Protection solaire : Cm = 0,6
  - Porosité Nord : 30%
  - Porosité Sud : 15%
  - Porosité Est, Ouest : 0%
- Conception 2.3 MOB
  - Isolation des murs : 4 cm
  - Protection solaire : Cm = 0,3
  - Porosité Nord, Sud = 0,15 %
  - Porosité Est, Ouest = 0 %

### 6.3.2 Mode actif

Les résultats des simulations thermiques détaillées pour les scénarios présentés précédemment et les usages présentés partie 3.3 sont présentés ci-dessous.

Le graphique présente les besoins surfaciques annuels en climatisation, et la température opérative (moyenne sur la journée la plus chaude) associée à chaque conception en 2025 et en 2070 :





*Note :* Nous observons des résultats différents par rapports aux simulations réalisées à l'étape 1. Ces différences peuvent s'expliquer des apports internes différents, une saisie plus précise et un changement du logiciel de simulation.

### Usages

Les besoins de climatisation varient fortement en fonction de l'usage, les besoins de climatisation sont moins importants dans les bureaux (180 kWh/m².an en moyenne), en comparaison avec les open-spaces (300 kWh/m².an en moyenne) et les salles de classe (444kWh/m².an en moyenne). Il faut ainsi 2,5 fois plus d'énergie pour climatiser un bureau qu'une salle de classe, en raison des apports internes (principalement liés à l'occupation) plus importants pour une salle de classe.

Les conceptions les plus performantes restent les mêmes quelques soit l'usage considéré.

### Principes constructifs

Les conclusions des études paramétriques se retrouvent ici, ainsi :

- Une protection solaire performante (avec un  $C_m=0,3$ ) couplée à une faible porosité (Conception 1.1 et 2.3) permet de réduire de manière significative les besoins de climatisation (réduction du besoin froid comprise entre **5 et 10%** par rapport à une conception bioclimatique classique (porosité > 25% sur deux façades).
- Une isolation permet également de réduire ces besoins de climatisation (Conception 2.1, 2.2 et 2.3).
- Une conception avec une porosité importante sans protection solaire dégrade fortement les performances, augmentant les besoins froids (Conception 1.2 : +15% par rapport à la plus performante conception BTC).
- Pour illustrer ces deux derniers points, les charges solaires surfaciques annuelles associées aux conceptions étudiées sont présentées ci-dessous. Le passage d'une conception ayant une porosité Nord et Sud de 30% à une conception ayant une porosité Nord de 15% entraîne une réduction des charges solaires de 47,28 kWh/m<sup>2</sup>.an.

Conception	Porosité	Protection Solaire	Charges solaires surfaciques annuelles – bureaux [kWh/m <sup>2</sup> .an]
0.1 - Béton	N/S 30%	$C_m=0,3$	63,18
0.2 - BTC	N/S 30%	$C_m=0,3$	61,83
0.3 - MOB	N/S 30%	$C_m=0,3$	61,83
1.1 - Béton	N 15%	$C_m=0,3$	15,9
2.1 - Béton	S 30%	Sans	43,39
1.2 - BTC	N/S/O 30%	Sans	166,84
2.2 - BTC	N/S 15%	$C_m=0,6$	42,27
1.3 - MOB	N 30%, S 15%	$C_m=0,6$	62,19
2.3 - MOB	N/S 15%	$C_m=0,3$	46,83

### Impact du changement climatique

L'impact du changement climatique en fonction de l'usage du local ne sera pas le même : ainsi, pour un open-space les besoins de climatisation augmentent uniquement de 6% contre plus de 20% pour les bureaux et les salles de classe. Cette différence peut s'expliquer par les apports thermiques internes, plus importants dans les open-space. L'augmentation des besoins liés aux changement climatique est donc moins importante en relatif.

Les mêmes tendances sont observées le climat actuel au niveau de l'influence de la porosité, de la protection solaire ainsi que l'isolation se dégagent, sauf pour le procédé constructif « Béton ». En effet, la conception 2.1 - Béton, avec une isolation des murs de 4 cm, sans protection solaire et une porosité Sud de 30 %, engendre un besoin de climatisation surfacique annuelle plus bas que la conception 1.1 - Béton et la conception 0.1 - Béton MayEnergie.

Les conceptions en MOB réagissent mieux au changement climatique, en effet l'augmentation du besoin de climatisation entre 2025 et 2070 est moins importante que pour les procédés conceptions en béton ou BTC.



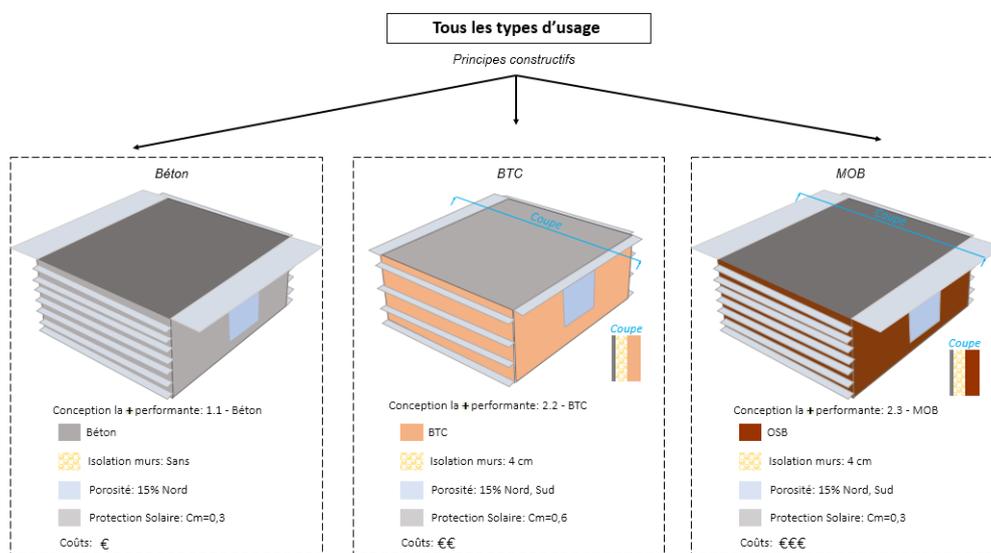
**Synthèse**

L'étude montre que, à horizon 2070, les besoins de climatisation augmenteront fortement : **jusqu'à +25%**.

Pour les locaux climatisés **toute l'année**, les conceptions les plus performantes différeront légèrement des conceptions bioclimatiques actuelles qui tendent vers des façades très poreuses : les locaux climatisés toute l'année devront privilégier **des porosités faibles <15%, une isolation des façades, et une protection solaire des baies performantes (Cm<0,3)**.

L'étude montre par ailleurs, que pour un même objectif de consommation, les conceptions peuvent différer : ainsi certains paramètres peuvent en compenser d'autres.

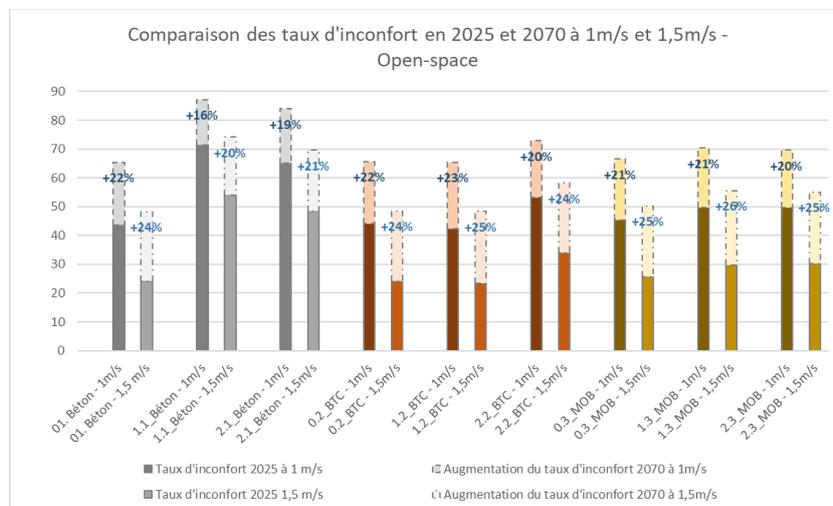
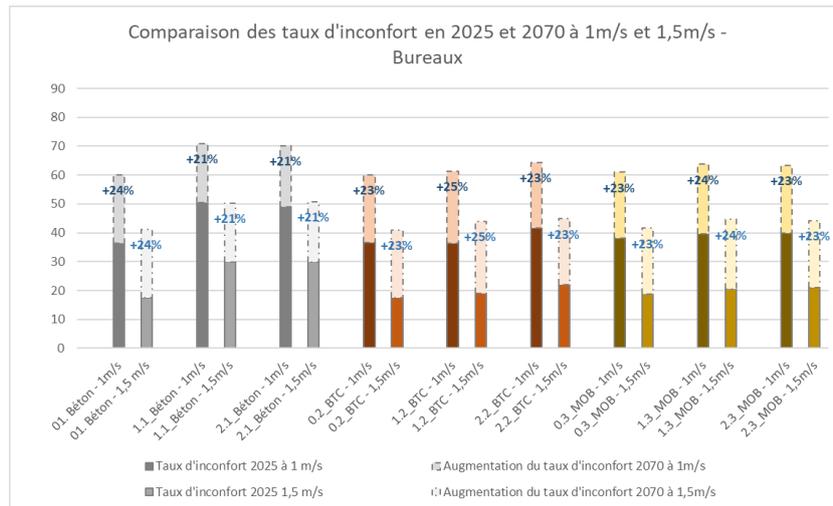
La figure suivante présente les conceptions simulées les plus performantes en termes de besoin de climatisation en 2025 et 2070 :

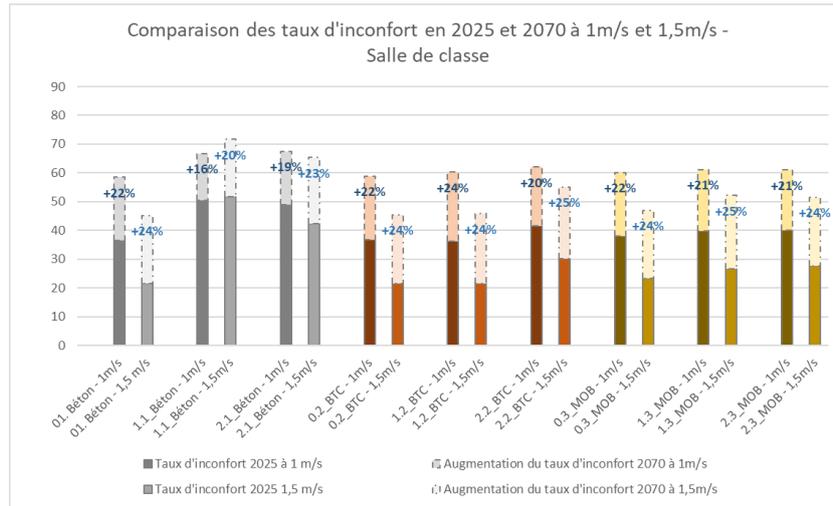


### 6.3.3 Mode passif

Il est présenté dans cette partie les taux d'inconfort correspondant aux zones de vitesse d'air 1 et 1,5m/s selon le diagramme de l'air humide de Givoni. Les taux sont calculés pour les périodes d'occupation de 7h à 17h. En fonction des porosités et des conditions extérieures, les vitesses d'air pourront être obtenues soit naturellement soit par l'usage des brasseurs d'air à plus ou moins pleine puissance.

L'étude des taux d'inconfort permet d'évaluer, pour un même procédé constructif, les écarts de performance entre les conceptions étudiées et les différents usages.





### Usages

En fonction de l'usage du bâtiment, bureaux, salle de classe ou open-space, les taux d'inconfort atteints varient : ainsi, les bureaux où les charges internes sont faibles (32,2 W/m<sup>2</sup>) peuvent, en 2025, atteindre des taux de d'inconfort de 17% à 1,5m/s contre un minimum de 21,5% et 24% pour les salles de classe et les open-spaces (respectivement 72,5 W/m<sup>2</sup> et 54,9W/m<sup>2</sup> de charges internes totales).

Plus les locaux ont de fortes charges internes, plus le besoin de renouvellement d'air est important pour assurer le confort thermique : ainsi, l'inconfort dans les open-spaces ou les salles de classes peut exploser et atteindre près de 70% d'inconfort pour des locaux non traversants (c'est par exemple le cas pour les conceptions béton 1.1 et 2.1).

Les conceptions les plus performantes restent les mêmes quelques soit l'usage considéré.

### Principes constructifs

- Les conceptions MayEnergie font partie des conceptions les plus performantes des variantes simulées, avec des écarts pouvant aller jusqu'à +28,8% en zone 1m/s et +30,2% en zone 1,5m/s pour la conception 1.1 – Béton pour un usage type salle de classe.
- A conception égale (porosité, protection solaire et isolation), les principes constructifs à forte inertie (Béton et BTC) sont légèrement plus performants que le MOB (inertie légère). Ils permettent en effet, pour un usage tertiaire en journée, de décaler les surchauffes thermiques en fin de journée.
- La sous-performance des conceptions en béton (Conception 1.1 et Conception 2.1) peut s'expliquer par leur faible porosité, qui diminue les taux de renouvellement d'air (taux de renouvellement d'air < 10 VOL/H), et donc l'évacuation des charges internes. Même en 2025, ces conceptions sont jugées très inconfortables.
- Plus la porosité est importante (Conception 0.1, 0.2, 0.3, 1.2, 1.3), plus les taux de renouvellement d'air augmentent, diminuant la sensation d'inconfort.
- Une conception en ventilation naturelle traversante (Conception 0.1, 0.2, 0.3, 1.2, 1.3, 2.2 et 2.3) est plus performante qu'une conception n'ayant qu'une façade exposée au vent (Conception 1.1 et 2.1). Elle permet d'atteindre des taux de renouvellement d'air entre 30 et 77 VOL/H.
- Une très grande porosité (Conception 1.2 : porosité de 30% sur 3 façades, avec des taux de renouvellement d'air important (77 VOL/H) peut compenser l'absence de protection solaires des baies.

### Conclusion :

- Plus la porosité est importante, plus le taux de renouvellement d'air augmente, diminuant en conséquence le taux d'inconfort.
- Une conception en ventilation naturelle traversante est plus performante qu'une conception avec une seule façade exposée au vent.

### Impact du changement climatique

- Les taux de d'inconfort augmentent de +15 à +25% en 2070 rendant l'usage de la climatisation indispensable certains jours, dans le cas le plus favorable (cas d'un bureau individuel, avec une conception performante 0.1), le taux d'inconfort minimal sera de 40% pour une vitesse d'air d'1,5m/s et 60% pour une vitesse d'air d'1,5m/s. Les taux d'inconfort peuvent monter jusqu'à 70% à 1,5 m/s dans une salle de classe avec de faible taux de porosité.
- Les mêmes tendances sont observées pour le climat actuel au niveau de l'influence de la porosité, de la protection solaire ainsi que l'isolation se dégagent.



### Synthèse

L'étude montre que, à horizon 2070, les taux d'inconfort augmenteront sensiblement : **jusqu'à +25%**.

Pour les locaux **fonctionnant toute l'année en ventilation naturelle**, les conceptions les plus performantes sont en cohérence avec les conceptions bioclimatiques actuelles : les conceptions les plus performantes présentent **à minima deux façades poreuses, une forte inertie, et une protection solaire des baies performantes (Cm<0,3)**.

L'étude montre par ailleurs, que pour un même objectif de confort, les conceptions peuvent légèrement différées, néanmoins des protections solaires efficaces et une ventilation traversante restent essentielles pour atteindre un confort thermique satisfaisant.

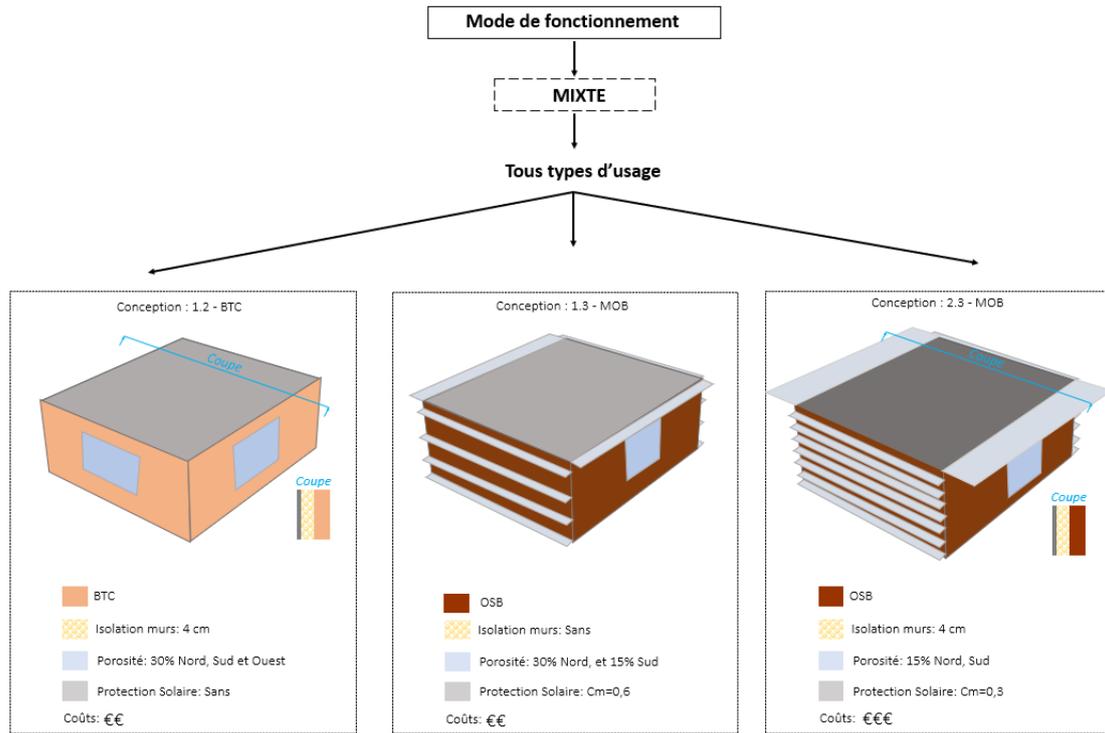


## 6.3.4 Fonctionnement mixte : ventilation naturelle et climatisation

Avec l'augmentation des températures lié au changement climatique (voir *Livable 1 CLIMAT*), on peut supposer que l'usage de la climatisation augmentera d'ici 2070 afin d'assurer un confort thermique satisfaisant toute l'année. L'un des premiers facteurs pour réduire les consommations de climatisation est la réduction des périodes de climatisation. Ainsi, un juste compromis devra être trouvé au niveau de la porosité et l'isolation pour ces bâtiments.

Les conceptions performantes en fonction du mode de fonctionnement (Mixte/Clim) sont présentées si dessous :

**Fonctionnement mixte :**



## 6.4. Etape 4 : Application de cas

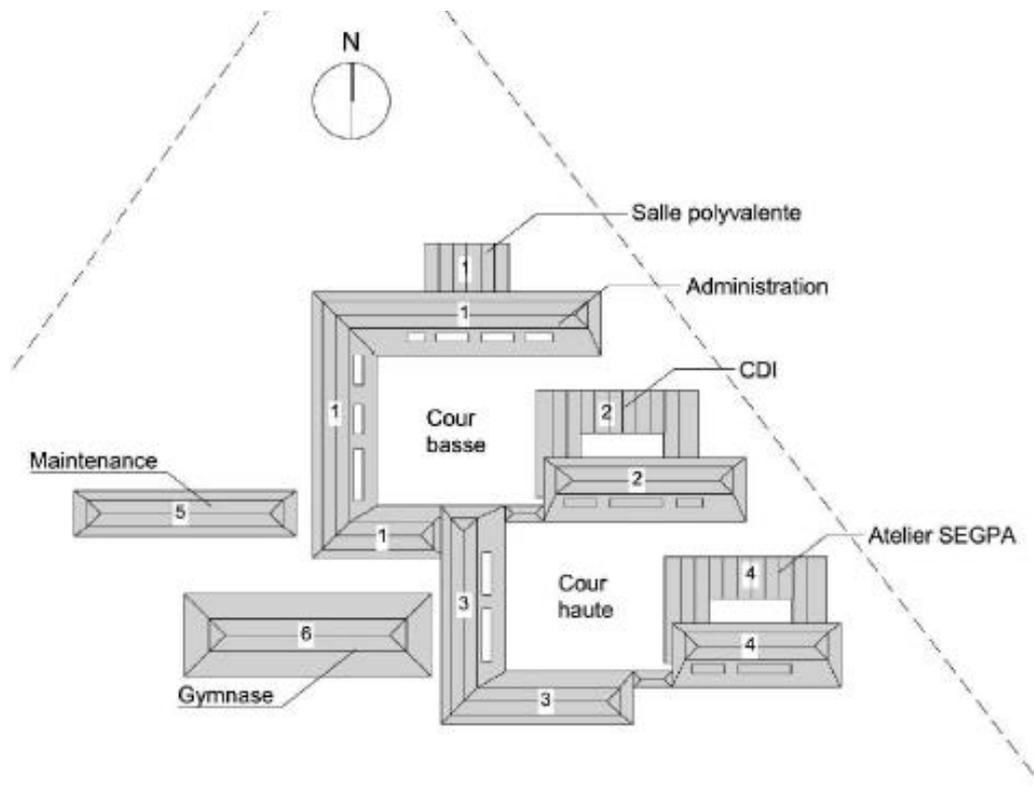
Les conclusions des études précédentes sont implantées dans deux projets réels afin de quantifier les économies de climatisation réalisables. Les projets étudiés sont :

- Le collège de Ouangani
- La technopole de Dembeni

Ils ont tous les deux fait l'objet d'une conception MayEnergie et sont conçus pour un fonctionnement en ventilation naturelle ou en mode mixte dépendamment des locaux.

### 6.4.1 Collège de Ouangani

Le collège Musuakua de Oungani est situé dans la commune du même nom, dans le village de Barakani. Il accueille 1 330 élèves. Une première tranche a été livrée en 2017 et une deuxième en 2018. D'un point de vue thermique, le bâtiment a été conçu selon les standards MayEnergie. La figure suivante présente le plan masse du projet :



*Plan du collège*

Trois typologies de locaux sont présentes au sein du projet :

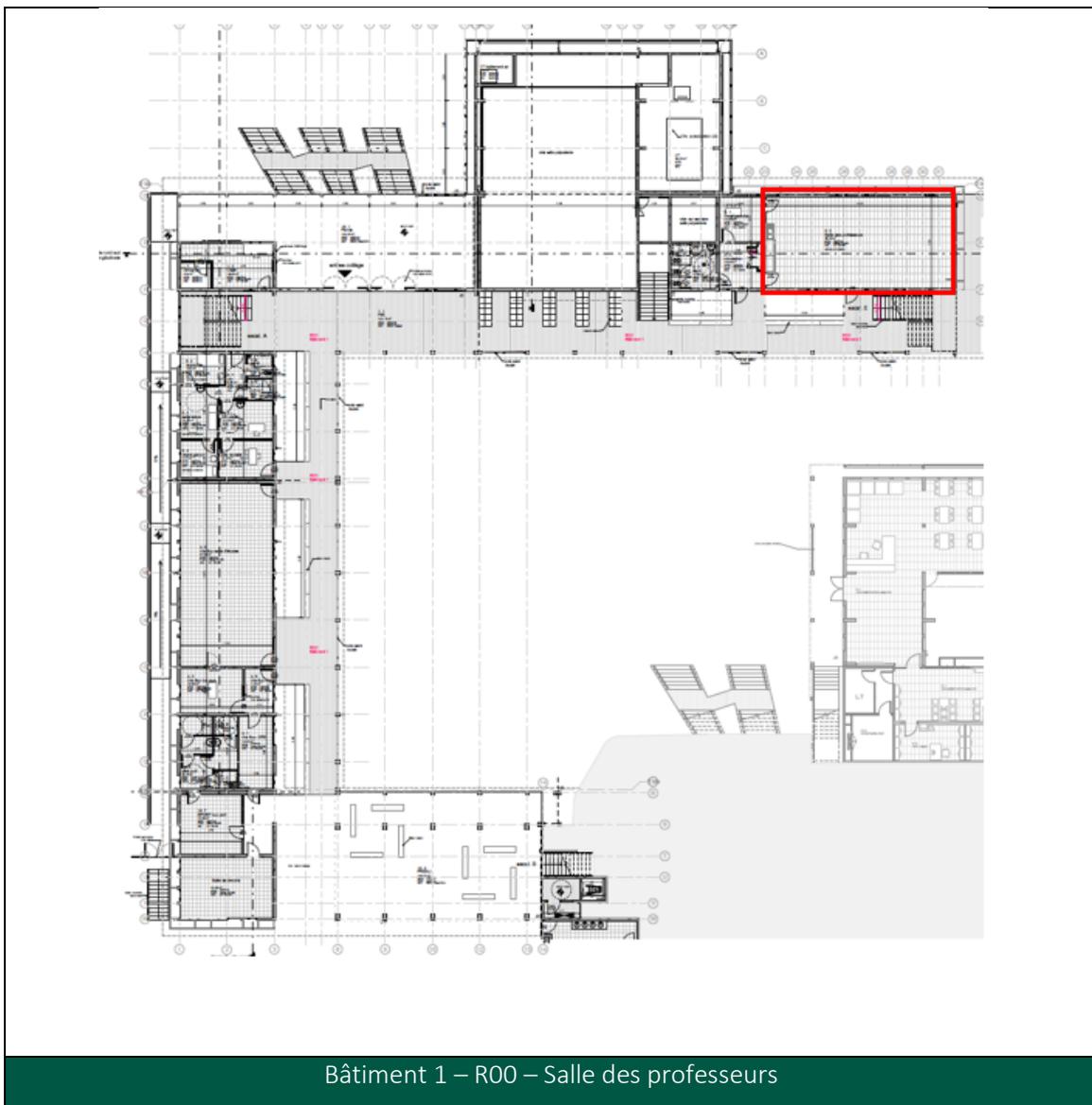
- Locaux passifs fonctionnant en ventilation naturelle toute l'année : salles de classe
- Locaux mixtes destinés à fonctionner en ventilation naturelle en période fraîche et en mode climatisé en période chaude : bureaux de l'administration

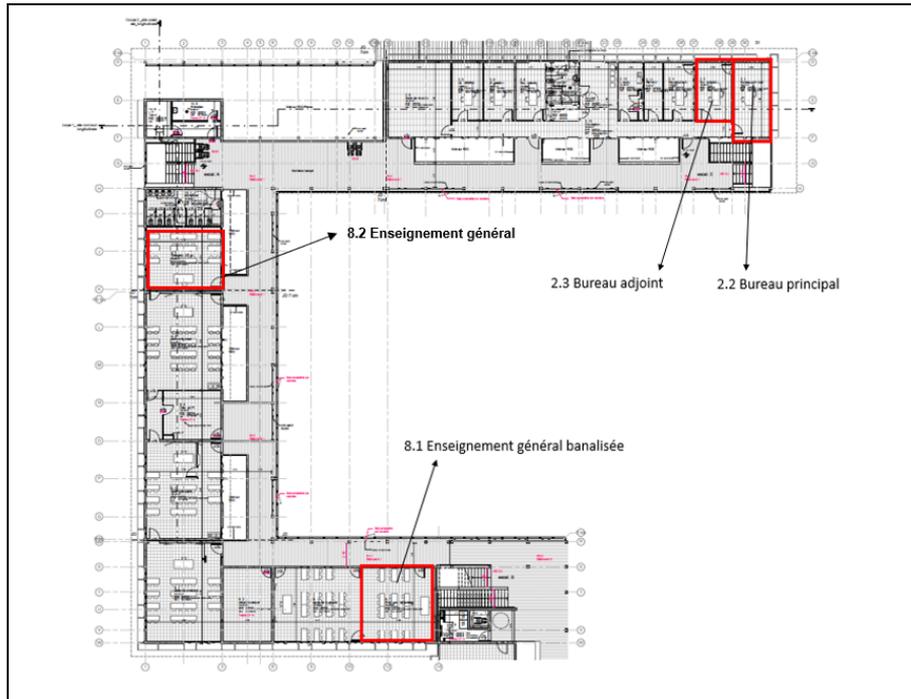
- Locaux climatisés à fortes charges internes fonctionnant en mode climatisation toute l'année : salles informatiques

Les conceptions performantes sont appliquées aux typologies salles de classe, bureau individuel et open-space à travers l'étude de 5 locaux orientés Nord/Sud un local orienté Est/Ouest :

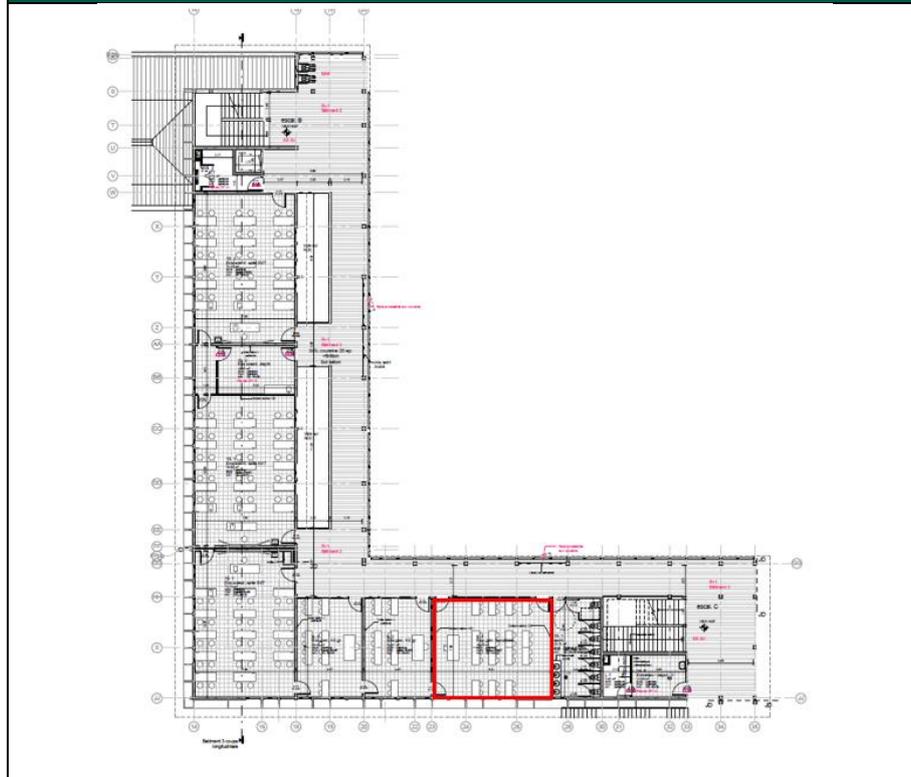
- 3.2 Salle des professeurs : open space
- 2.2 Bureau principal : bureau individuel
- 2.3 Bureau adjoint : bureau individuel
- 8.1 Salle banalisée : salle de classe
- 8.1 : Enseignement général banalisé
- 8.2 Salle d'enseignement général

Les locaux étudiés sont repérés sur les plans suivants :





Bâtiment 1 – R01 – Bureau principal et Bureau adjoint, salle d’enseignement banalisée et Salle d’enseignement général



Bâtiment 3 – R01 – Salle d’enseignement banalisée

Les procédés constructifs sont présentés dans le tableau suivant :

Mur extérieur - Béton (alpha = 0.6)					
Matériaux ( ext -> int)	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique (J/kg.K)	Résistance thermique
Béton armé	0,15	1,75	2400	900	0,0857

Plancher bas - Béton					
Matériaux ( ext -> int)	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique (J/kg.K)	Résistance thermique
Béton armé	0,2	1,75	2400	880	0,114

Plancher intermédiaire - Béton					
Matériaux ( ext -> int)	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique (J/kg.K)	Résistance thermique
Béton armé	0,15	1,75	2400	880	0,0857

Toiture – Tôle (alpha = 0.7)					
Matériaux ( ext -> int)	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m3)	Capacité thermique (J/kg.K)	Résistance thermique
Tôle	0,002	55	7800	480	0
Isolant	0,08	0,04	30	1000	2
BA 13	0,013	0,25	900	1000	0,004

Vitrage clair			
Type de vitrage	Transmission lumineuse	Facteur solaire	Uw (W/m².K)
6mm clair	80%	0,8	5

Les caractéristiques thermiques des locaux tels que construits sont présentées dans le tableau suivant :

Local	Typologie de protection solaire	Coefficient de masque	Porosité
Salle des professeurs	<u>Nord</u> : Tôle perforée + débord de toiture de 1,208 m <u>Sud</u> : Brises soleil + débord de toiture de 5,30 m <u>Est</u> : Tôle perforée + débord de toiture de 0,8 m	Nord : Cm < 0,3 Sud : 0,23 Est : Cm < 0,3	Nord : 16% Sud : 20% Est : 11%
Bureau principal	<u>Nord</u> : Tôle perforée + débord de toiture de 1,208 m <u>Sud</u> : Brises soleil + débord de toiture de 5,30 m <u>Est</u> : Tôle perforée + débord de toiture de 0,8 m	Nord : Cm < 0,3 Sud : 0,26 Est : Cm < 0,3	Nord : 12% Sud : 24% Est : 12%
Bureau adjoint	<u>Nord</u> : Tôle perforée + débord de toiture de 1,208 m <u>Sud</u> : Brises soleil + débord de toiture de 5,30 m	Nord : Cm < 0,3 Sud : Cm < 0,1	Nord : 25% Sud : 0%
Salle d'enseignement banalisée B1	<u>Nord</u> : Brises soleil + débord de toiture de 3,35 m <u>Sud</u> : Tôle perforée	Nord : 0,16 Sud : Cm < 0,3	Nord : 25% Sud : 31%
Salle d'enseignement banalisée B3	<u>Nord</u> : Brises soleil + débord de toiture de 3,35 m <u>Sud</u> : Tôle perforée	Nord : 0,36 Sud : Cm < 0,3	Nord : 29% Sud : 27%
Salle d'enseignement général B1	<u>Est</u> : Brises soleil + débord de toiture de 5,30 m <u>Ouest</u> : Tôle perforée + débord de toiture de 1,574 m	Est : < 0,3 Ouest : < 0,3	Est : 15% Ouest : 22%

Nous avons considéré un coefficient de masque des tôles perforées égale à 0,3.

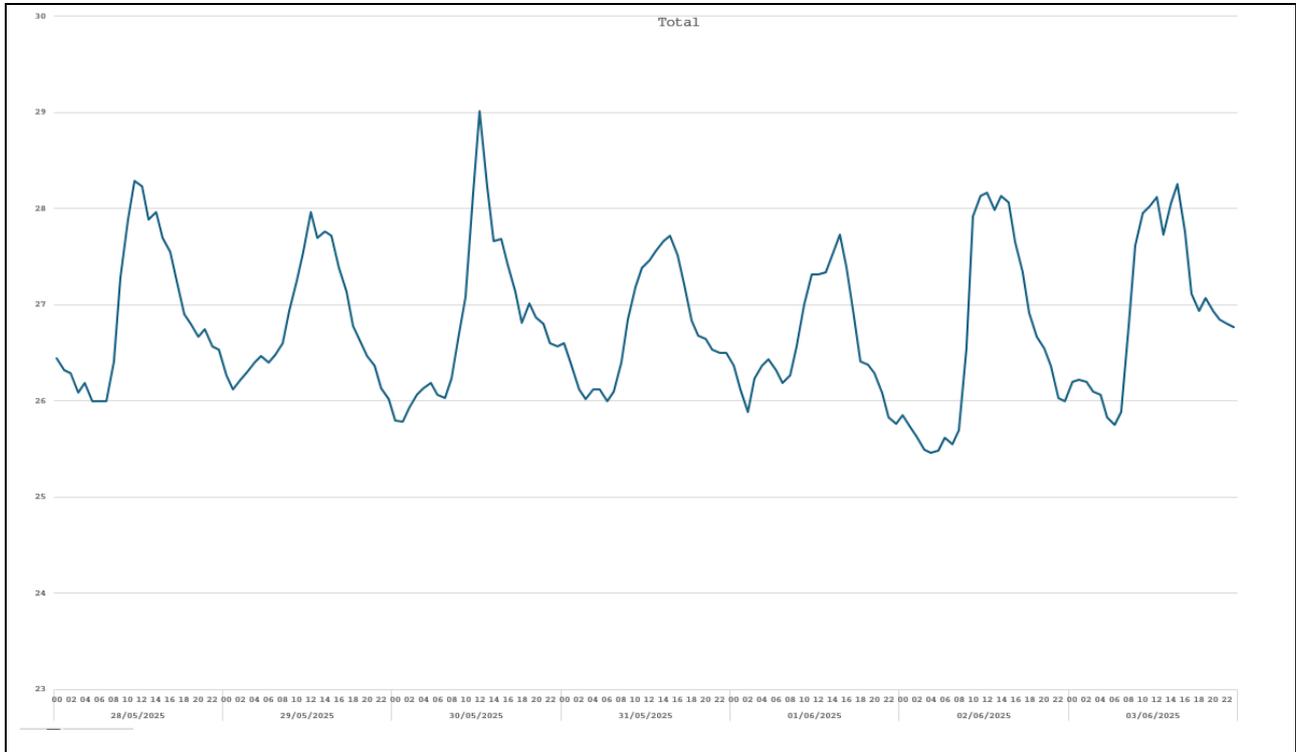
Les hypothèses de fonctionnement correspondent à celles présentées partie 4.4. Les vacances scolaires ont été intégrées à la simulation. La température de consigne est fixée à 25°C, selon le *Livrable 2 – Instrumentation*, la température de consigne peut être ponctuellement plus basse, d'où des consommations énergétiques réelles plus élevées.

Les bureaux et la salle des professeurs sont considérés climatisés toute l'année. Les salles d'enseignement sont considérées en fonctionnement en ventilation naturelle toute l'année.

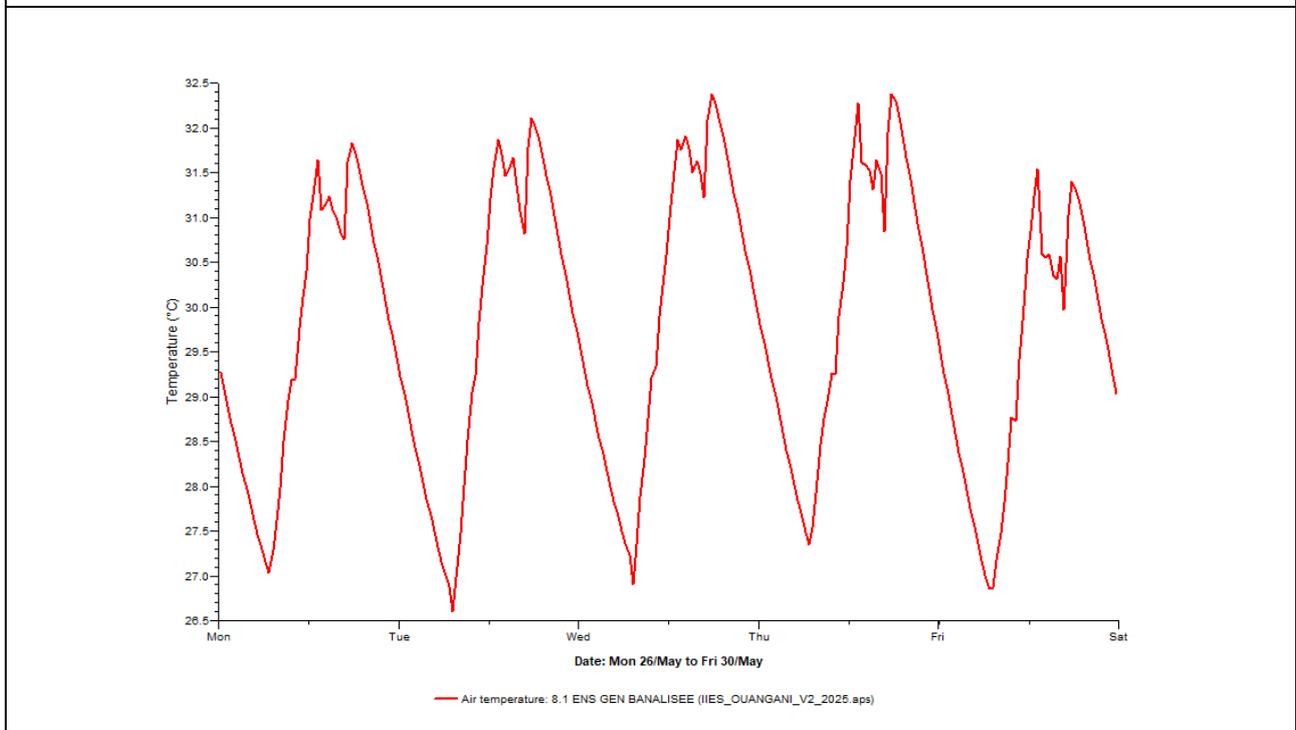
Résultats tels que construits

**Comparaison entre l'évolution des températures intérieures issues de la STD et issues de l'instrumentation**

Les évolutions journalières des températures mesurées et simulées lors d'une journée d'été type sont présentées ci-dessous :



*Évolution des températures mesurées dans la salle de classe banalisée B3 – dernière semaine de mai 2025*



*Évolution des températures simulées dans la salle de classe banalisée B3 – dernière semaine de mai 2025*

Concernant le cas mesuré, les températures commencent à augmenter à partir du début de la période d'occupation et jusqu'à midi. Elles diminuent ensuite légèrement pendant la pause déjeuner du fait de la non-occupation des locaux. En début d'après-midi, l'évolution des températures repart à la hausse jusqu'à la fin de l'occupation ou elles à diminuent pendant toute la durée de la nuit.

Concernant le cas simulé, les températures augmentent aussi à partir du début de la période d'occupation. Et diminuent également à partir de midi, lors de la pause déjeunée, qui a été modélisée dans l'utilisation des locaux, les températures augmentent jusqu'au milieu de l'après-midi. À partir de cet instant, la température décroît légèrement jusqu'à la fin de la période d'occupation. Il est alors observé une augmentation des températures intérieures en début de soirée dû à la fermeture des fenêtres hors occupation. Les températures diminuent ensuite pendant la nuit à partir de 20h.

Il est aussi observé que les températures du cas simulé sont en moyenne plus élevées que celle du cas mesuré (entre 26,6°C et 31,50°C pour le cas simulé, en période d'occupation et 25,8°C et 29°C pour le cas mesuré).

### Consommations énergétiques

Les consommations énergétiques du bâtiment tel que construit en 2025 et en 2070 (RCP 4.5) sont présentées ci-dessous. La climatisation représente 18% des consommations énergétiques en 2025, avec une augmentation de plus de 31% des consommations de climatisation prévue en 2070.

Consommations énergétiques - bâtiment existant [kWh/m <sup>2</sup> .an]					
Poste de consommations	2025		2070		Augmentation des consommations d'énergie 2070 [%]
	Consommations énergétiques [kWh/m <sup>2</sup> .an]	%	Consommations énergétiques [kWh/m <sup>2</sup> .an]	%	
Climatisation	6,1	18%	8,0	23%	31%
Eclairage	9,4	29%	9,4	27%	0%
Ventilation	10,2	31%	10,2	29%	0%
Equipements	7,2	22%	7,2	21%	0%
<b>TOTAL</b>	<b>32,8</b>		<b>34,7</b>		

Note : Les consommations de climatisation sont légèrement sous estimées par rapport aux réels. En effet, il a été constaté sur site des températures de consigne plus basses (jusqu'à 16°C pour la salle des professeurs) et des oublis d'extinction de la climatisation la nuit.

### Confort thermique

Si on considère un fonctionnement 100% passif, en 2025, le bâtiment est confortable en moyenne près de 75% du temps d'occupation en considérant une vitesse d'air d'1,5 m/s. En revanche, en 2070 l'inconfort atteint 46% du temps d'occupation. L'usage de la climatisation sera indispensable lors de la période chaude.

Locaux	2025		2070	
	Toute l'année		Toute l'année	
	1 m/s	1,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s
Bât 1 – R00 – Salle des professeurs	33%	14%	57%	36%
Bât 1 – R01 – Bureau principal	39%	20%	62%	43%
Bât 1 – R01 – Bureau adjoint	65%	43%	75%	56%
Bât 1 – R01 – Enseignement général banalisée	41%	22%	64%	45%
Bât 1 – R01 – Enseignement général	49%	29%	71%	54%
Bât 3 – R01 – Enseignement banalisée	39%	20%	63%	43%
MOYENNE	44%	25%	65%	46%

*Taux d'inconfort thermique des locaux étudiés en 2025 et 2070*

## Optimisations

Les optimisations suivantes ont été étudiées dans une optique de réduire les consommations d'énergie du bâtiment en 2070 tout en assurant un confort thermique satisfaisant aux utilisateurs. Nous rappelons que la conception du Collège de Ouangani a intégré les principes de conception bioclimatiques et est actuellement un bâtiment démonstrateur dans ce domaine. Le bâtiment étant déjà construit, certains paramètres comme l'orientation, le positionnement des ouvrants, les principes constructifs des murs sont considérés comme fixes.

En lien avec les simulations précédentes, nos préconisations portent sur l'optimisation le bâti et la régulation de la climatisation. Les optimisations sur les équipements techniques (système de climatisations et aux postes de consommation : éclairage, ventilation, ect...) ne sont pas étudiées dans ces simulations.

Les optimisations suivantes sont étudiées :

- Augmentation des températures de consigne à 28°C et fonctionnement des brasseurs d'air (Bureaux et salle des professeurs)
- Arrêt de la climatisation 3 mois dans l'année (de Juin à Septembre) avec brasseurs d'air (Bureaux et salle des professeurs)
- Arrêt de la climatisation 6 mois dans l'année (de Mai à Octobre) avec brasseurs d'air (Bureaux et salle des professeurs)
- Isolation des murs non isolés en béton
- Murs extérieurs de couleur claire ( $\alpha=0,4$ )
- Menuiseries plus étanches à l'air (types ouvrants à la française)
- Vitrage plus performant ( $g= 0,5$ )

Certaines optimisations sont liées à de la régulation et de la **sensibilisation des usagers** (température de consigne, utilisation des brasseurs d'air, arrêt de la climatisation), d'autres sont envisageables sur temps plus long lors d'une rénovation du bâti (25 à 50 ans).

## Résultats

Les résultats sont présentés pour le climat actuel et 2070.

Intégration des optimisations énergétiques - Impact sur les consommations de climatisation		
	2025	2070
Augmentation des températures de consigne (28°C) et brasseurs d'air	-49%	-42%
Arrêt de la climatisation - 3 mois dans l'année et brasseurs d'air	-13%	-15%
Arrêt de la climatisation - 6 mois dans l'année et brasseurs d'air	-37%	-39%
Isolation des murs non isolés	-4%	-4%
Murs clairs ( $\alpha=0,4$ )	-1%	-1%
Mise en œuvre de menuiseries plus étanches à l'air (types ouvrants à la française)	-7%	-8%
Facteurs solaires des vitrages = 0,5	-2%	-2%
<b>Cumul des préconisations</b>	<b>-68%</b>	<b>-66%</b>

En cumulant les optimisations, **les consommations de climatisation peuvent être réduites de 66% à horizon 2070.**

Les optimisations les plus impactantes sont liées à la régulation de la climatisation, comme l'arrêt de la climatisation lors des périodes les plus fraîches et l'augmentation de la température de consigne. L'intégration de brasseur d'air dans les bureaux ainsi que la salle des professeurs permettrait d'augmenter la température de consigne.

Une sensibilisation des usagers sur les consommations d'énergie et le fonctionnement du bâtiment en amont est donc indispensable.

Afin de vérifier que le bâtiment sera confortable pendant les périodes d'arrêt de la climatisation, les taux d'inconfort ont été calculés dans les locaux étudiés :

Locaux	2070			
	3 mois		6 mois	
	1m/s	1,5m/s	1m/s	1,5m/s
Bât 1 – R00 – Salle des professeurs	20%	3%	31%	10%
Bât 1 – R01 – Bureau principal	33%	13%	46%	23%
Bât 1 – R01 – Bureau adjoint	44%	24%	67%	49%
Bât 1 – R01 – Enseignement général banalisée	33%	12%	43%	20%
Bât 1 – R01 – Enseignement général	50%	20%	57%	29%
Bât 3 – R01 – Enseignement banalisée	29%	6%	37%	16%
MOYENNE	35%	13%	43%	28%

*Taux d'inconfort en 2070*

Avec en moyenne des taux d'inconfort en zone 1,5m/s, inférieur à 20% pour un arrêt de la climatisation de 3 mois et 30% pour 6 mois (hors bureau adjoint), pendant les mois les plus frais, le bâtiment sera confortable.

### Application à l'ensemble du bâtiment

Les consommations du bâtiment actuel sont estimées à **161 MWh/an** (en considérant un fonctionnement normal du bâtiment et sur les postes de consommations étudiés) et **171 MWh/an en 2070**. En intégrant les préconisations, les consommations d'énergie sont estimées à **141 MWh/an** en 2025 et **145 MWh/an** en 2070, soit une économie financière de 4 075€/an en 2025 et 5 185€/an 2070.

	2025	2070	2025 optimisé	2070 optimisé
Consommations bâtiment [MWh/an]	161	171	141	145
Coût annuel	32 293 €	34 157 €	28 218 €	28 972 €
Emissions de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> e]	109 796	116 134	95 942	98 504
Économies sur une année [€]	-	-	4 075 €	5 185 €
Économies sur une année [kgCO <sub>2</sub> e]	-	-	13 854	17 630
Économies sur 50 ans [€]	-	-	203 735 €	259 268 €
Économies sur 50 ans [kgCO <sub>2</sub> e]	-	-	692 698	881 511

## 6.4.2 Technopole de Dembeni

La Technopole de Dembeni est située dans les hauteurs de la commune du même nom, surplombant ainsi l'agglomération. Le bâtiment a été livré en 2023 et comporte des espaces de bureaux, des espaces de travail en open-space, une salle polyvalente ainsi que des ateliers. D'un point de vue thermique, le bâtiment a été conçu selon les standards MayEnergie afin de viser une conception architecturale et bioclimatique pour un fonctionnement semi-passif.

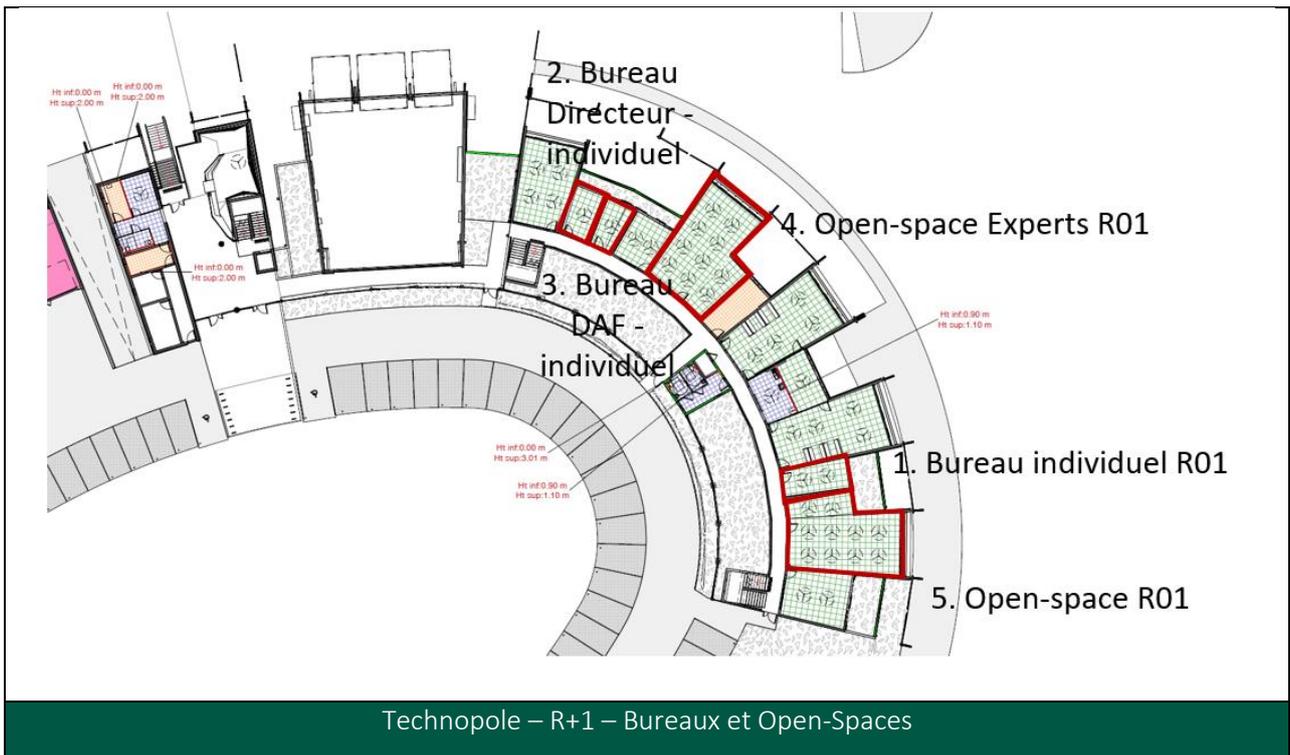
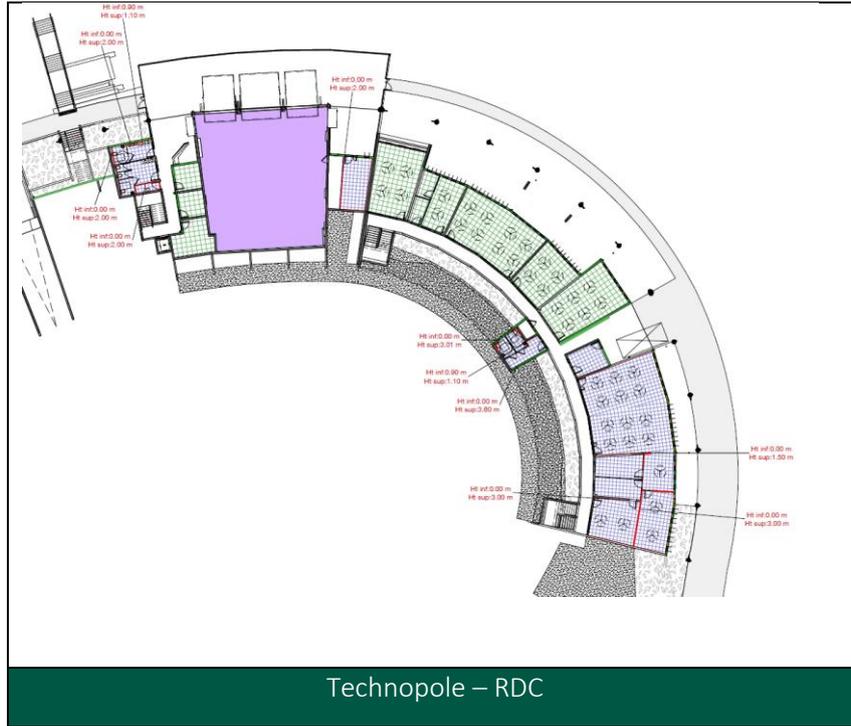


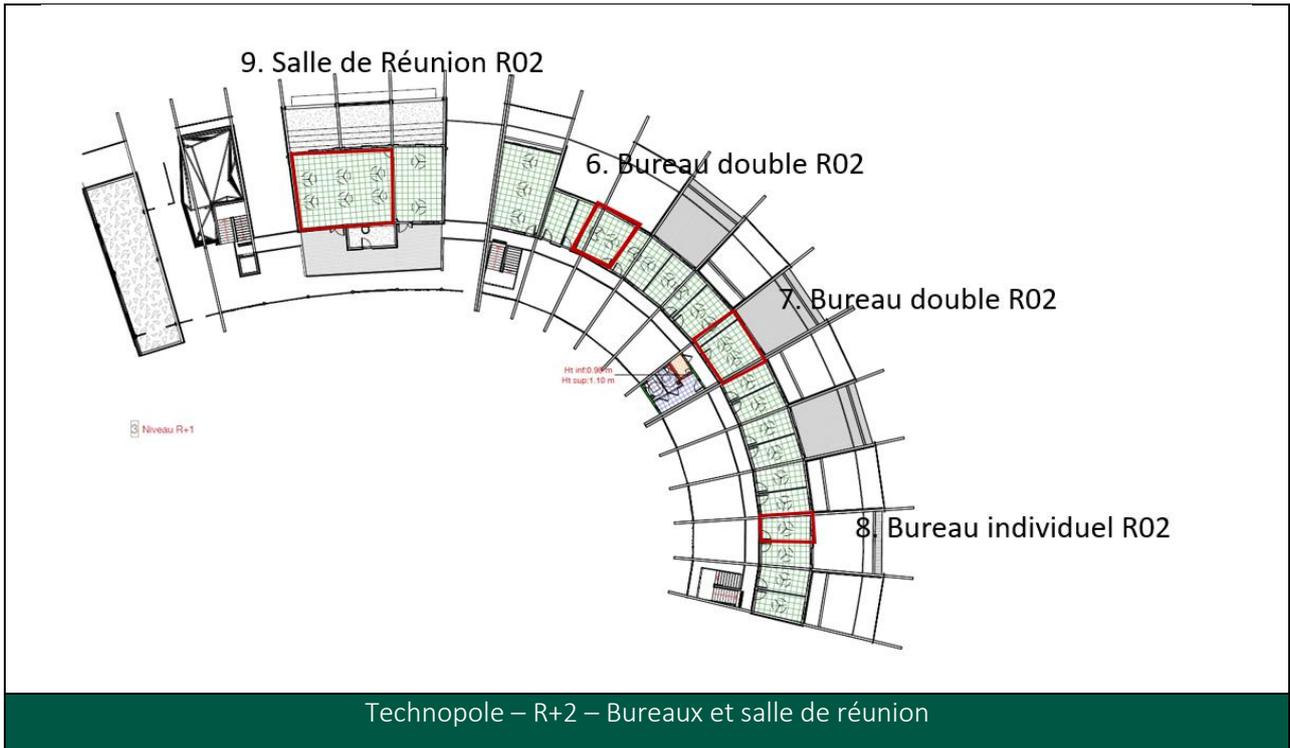
Photos de la technopole – Novembre 2023 - Architectes : TAND'M

Suite au passage du Chido, le bâtiment est en partie non occupé. Bien que le bâtiment soit conçu pour fonctionner en fonctionnement mixte climatisation / ventilation naturelle, lors de nos observations sur le terrain (se référer au livrable *Instrumentation*), nous avons constaté que les usagers avaient grandement recours à la climatisation même pendant les périodes considérées comme plus fraîches (Juin à Septembre). Ainsi, nous étudierons dans notre cas initial :

- Des bureaux individuels, considérés comme climatisés toute l'année
- Des espaces de travail en open-space, eux aussi climatisés toute l'année

Les locaux étudiés sont repérés sur les plans suivants. Ils ont été sélectionnés car ils présentent des orientations, des protections solaires et des porosités différentes et sont donc représentatifs des consommations générales du bâtiment.





Les procédés constructifs mis en œuvre sur le bâtiment étudié sont présentés dans le tableau suivant :

Typologie	Composition ( de l'extérieur vers l'intérieur)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Densité (kg/m3)	Chaleur spécifique (J/(kg.K))	Résistance (m <sup>2</sup> K/W)
Toiture légère	Plâtre - 10mm	0,21	700	1000	2,5133
	Lame d'air - 12mm	-	-	-	
	Isolation PSE - 80mm	0,035	25	1400	
Toiture terrasse + faux plafond	Béton 15cm	1,4	2100	840	2,6324
	Isolation PSE 80mm	0,035	25	1400	
	Lame d'air - 12mm	-	-	-	
	Doublement plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	
Toiture tôle	Tôle acier 75/100	50	7800	480	2,3453
	Isolation laine minérale - 80mm	0,035	30	1000	
	Doublement plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	
Toiture terrasse sur circulation	Béton 20cm	1,4	2100	840	2,5395
	Isolation PSE 80mm	0,035	25	1400	
	Lame d'air - 12mm	-	-	-	
	Doublement plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	
Plancher intermédiaire avec faux plafond	Béton 15cm	1,4	2100	840	0,5252
	Lame d'air - 12mm	-	-	-	
	Doublement plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	
Plancher intermédiaire béton	Béton 15cm	1,4	2100	840	0,1071
Toiture terrasse végétalisée	Substrat - 40cm	1,79	1800	1190	2,0967
	Béton 20cm	1,4	2100	840	
	Isolation PSE 60mm	0,035	25	1400	
	Lame d'air - 12mm	-	-	-	
	Doublement plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	
Mur ossature bois	Bardage bois 1cm	0,14	530	1800	1,78

Typologie	Composition ( de l'extérieur vers l'intérieur)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Densité (kg/m3)	Chaleur spécifique (J/(kg.K))	Résistance (m²K/W)
	Lame d'air ventilée - 30mm	-	-	-	
	Isolant laine minérale - 50mm	0,035	30	1000	
	Plaque de plâtre BA13 - 13mm	0,21	1300	1000	
Mur Béton	Béton 18cm	1,4	2100	840	0,1286
Mur Béton avec bardage bois	Bardage bois 2cm	0,121	593	837	0,2939
	Lame d'air ventilée	-	-	-	
	Béton 18cm	1,4	2100	840	
Cloisons intérieures 72/48	Plaque de plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	1,4048
	Laine de verre 45mm	0,035	30	1000	
	Plaque de plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	
Cloisons intérieures 98/48	Plaque de plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	1,5238
	Plaque de plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	
	Laine de verre 45mm	0,035	30	1000	
	Plaque de plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	
	Plaque de plâtre BA13 - 13mm	0,21	700	1000	
Mur de refend	Béton - 15cm	1,4	2100	840	0,1071
Dallage	Béton - 15cm	1,4	2100	840	0,1071

Typologie	Composition (de l'extérieur vers l'intérieur)	Facteur solaire	Ug W/m².K	TL
Simple vitrage	Verre 6mm	0,71	5,3	76%
Toile Tendue	-	0,1	5,4	8%

Les caractéristiques thermiques des locaux tels que construits sont présentées dans le tableau suivant :

Local	Façade	Typologie de protection solaire	Coefficient de masque	Porosité
1. Bureau individuel R01	Ouest	Coursive	0,45	21%
	Est	Toile et débord	0,38	36%
2. Bureau Directeur -individuel	Nord	Toile et débord	0,13	50%
	Sud	Coursive	0,12	27%
3. Bureau DAF -individuel	Nord	Toile et débord	0,2	36%
	Sud	Coursive	0,26	12%
4. Open-space Experts R01	Nord	Débord et brise-soleils	0,41	17%
	Ouest	Coursive	0,34	20%
5. Open-space R01	Est	Débord et brise-soleils	0,19	31%
	Ouest	Coursive	0,44	28%
6. Bureau double R02	Nord	Toile et débord	0,07	37%
	Sud	Toile et débord	0,19	14%
7. Bureau double R02	Nord	Toile et débord	0,07	37%
	Sud	Toile et débord	0,19	14%
8. Bureau individuel R02	Est	Toile et débord	0,12	31%
	Ouest	Toile et débord	0,34	24%
9. Salle de Réunion R02	Nord	Toile et débord	0,12	34%
	Sud	Toile et débord	0,19	18%

Les hypothèses de fonctionnement correspondent à celles présentées partie 4.4.

## Résultats tels que construits

### Consommations énergétiques

Les consommations énergétiques du bâtiment en 2025 et en 2070 (RCP 4.5) sont présentées ci-dessous. La climatisation représente près de la moitié des consommations énergétiques en 2025, avec une augmentation de plus de 15% des consommations de climatisation prévue en 2070.

Consommations énergétiques - bâtiment existant [kWh/m <sup>2</sup> .an]					
Poste de consommations	2025		2070		Augmentation des consommations d'énergie 2070 [%]
	Consommations énergétiques [kWh/m <sup>2</sup> .an]	%	Consommations énergétiques [kWh/m <sup>2</sup> .an]	%	
Climatisation	107,3	47%	124,6	51%	16%
Eclairage	17,9	8%	17,9	7%	0%
Ventilation	29,5	13%	29,5	12%	0%
Equipements	71,9	32%	71,9	29%	0%
<b>TOTAL</b>	<b>226,5</b>		<b>243,9</b>		<b>8%</b>

### Confort thermique

Si on considère un fonctionnement 100% passif, en 2025, le bâtiment est confortable en moyenne près de 85% du temps d'occupation en considérant une vitesse d'air d'1,5 m/s. Seuls les locaux avec une occupation plus dense (type open-space) sont légèrement en dessous de ce taux. En revanche, en 2070, l'inconfort atteint 40% du temps d'occupation. L'usage de la climatisation sera indispensable.

Locaux	2025		2070	
	Toute l'année		Toute l'année	
	1 m/s	1,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s
1. Bureau individuel R01	32%	16%	58%	37%
2. Bureau Directeur -individuel	32%	13%	57%	37%
3. Bureau DAF -individuel	32%	13%	57%	37%
4. Open-space Experts R01	37%	17%	61%	42%
5. Open-space R01	36%	17%	58%	38%
6. Bureau double R02	35%	15%	59%	39%
7. Bureau double R02	35%	16%	59%	39%
8. Bureau individuel R02	35%	17%	60%	40%
9. Salle de Réunion R02	33%	15%	58%	38%
MOYENNE	34%	16%	59%	39%

*Taux d'inconfort thermique des locaux étudiés en 2025 et 2070*

## Optimisations

Les optimisations suivantes ont été étudiées dans une optique de réduire les consommations d'énergie du bâtiment en 2070 tout en assurant un confort thermique satisfaisant aux utilisateurs. Nous rappelons que la conception du bâtiment de la Technopole a intégré les principes de conception bioclimatique et est actuellement un bâtiment démonstrateur dans ce domaine. Le bâtiment étant déjà construit, certains paramètres comme l'orientation, le positionnement des ouvrants, les principes constructifs des murs sont considérés comme fixes.

En lien avec les simulations précédentes, nos préconisations portent sur l'optimisation le bâti et la régulation de la climatisation. Les optimisations sur les équipements techniques (système de climatisations et aux postes de consommation : éclairage, ventilation, ect...) ne sont pas étudiées dans ces simulations.

Les optimisations suivantes sont étudiées :

- Augmentation des températures de consigne à 28°C et fonctionnement des brasseurs d'air
- Arrêt de la climatisation 3 mois dans l'année (de Juin à Septembre) avec brasseurs d'air
- Arrêt de la climatisation 6 mois dans l'année (de Mai à Octobre) avec brasseurs d'air
- Isolation des murs non isolés en béton
- Murs extérieurs de couleur claire ( $\alpha=0,4$ )
- Menuiseries plus étanches à l'air (types ouvrants à la française)
- Vitrage plus performant ( $g= 0,5$ )

Certaines optimisations sont liées à de la régulation et de la **sensibilisation des usagers** (température de consigne, utilisation des brasseurs d'air, arrêt de la climatisation), d'autres sont envisageables sur temps plus long lors d'une rénovation du bâti (25 à 50 ans).

## Résultats

Les résultats sont présentés pour le climat actuel et 2070.

Intégration des optimisations énergétiques - Impact sur les consommations de climatisation		
	2025	2070
Augmentation des températures de consigne (28°C) et brasseurs d'air	-3%	-3%
Arrêt de la climatisation - 3 mois dans l'année et brasseurs d'air	-15%	-16%
Arrêt de la climatisation - 6 mois dans l'année et brasseurs d'air	-34%	-36%
Isolation des murs non isolés	-1%	-2%
Murs clairs ( $\alpha=0,4$ )	-2%	-1%
Mise en œuvre de menuiseries plus étanches à l'air (types ouvrants à la française)	-4%	-8%
Facteurs solaires des vitrages = 0,5	-6%	-5%
<b>Cumul des préconisations</b>	<b>-50%</b>	<b>-51%</b>

En cumulant les optimisations, les consommations de climatisation peuvent être réduites de 50% à horizon 2070.

Les optimisations les plus impactantes sont liées à la régulation de la climatisation, comme l'arrêt de la climatisation lors des périodes les plus fraîches. Une sensibilisation des usagers sur les consommations d'énergie et le fonctionnement du bâtiment en amont est donc indispensable.

A noter que l'impact de l'isolation sur les consommations d'énergie est moins important que les résultats obtenus dans les études précédentes, le bâtiment étant déjà en grande partie isolé (au niveau des murs MOB).

Afin de vérifier que le bâtiment sera confortable pendant les périodes d'arrêt de la climatisation, les taux d'inconfort ont été calculés dans les locaux étudiés :

Locaux	2070			
	3 mois		6 mois	
	1m/s	1,5m/s	1m/s	1,5m/s
1. Bureau individuel R01	6,3%	0,6%	27,6%	11,0%
2. Bureau Directeur -individuel	6,7%	0,7%	27,8%	11,1%
3. Bureau DAF -individuel	6,7%	0,6%	27,9%	11,2%
4. Open-space Experts R01	11,5%	1,2%	32,3%	14,6%
5. Open-space R01	10,4%	1,0%	31,4%	14,1%
6. Bureau double R02	8,4%	1,0%	29,2%	12,2%
7. Bureau double R02	8,8%	1,0%	29,8%	12,5%
8. Bureau individuel R02	10,0%	1,0%	30,7%	13,2%
9. Salle de Réunion R02	9,0%	0,9%	29,1%	12,0%
MOYENNE	8,6%	0,9%	29,5%	12,4%

### Taux d'inconfort en 2070

Avec en moyenne des taux d'inconfort inférieur à 15% pendant les mois les plus frais, le bâtiment sera confortable lors des périodes d'arrêt de la climatisation.

### Application à l'ensemble du bâtiment

Les consommations du bâtiment actuel sont estimées à **277 MWh/an** (en considérant un fonctionnement normal du bâtiment) et **325 MWh/an en 2070**. En intégrant les préconisations, les consommations d'énergie sont estimées à **230 MWh/an** en 2025 et **241 MWh/an** en 2070, soit une économie financière de 9 444€ en 2025 et 16 811€ en 2070.

	2025	2070	2025 optimisé	2070 optimisé
Consommations bâtiment [MWh/an]	277	325	230	241
Coût annuel	55 399 €	64 977 €	45 955 €	48 167 €
Emissions de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> e]	188 355	220 923	156 247	163 767
Économies sur une année [€]	-	-	9 444 €	16 811 €
Économies sur une année [kgCO <sub>2</sub> e]	-	-	32 109	57 156
Économies sur 50 ans [€]	-	-	472 185 €	840 531 €
Économies sur 50 ans [kgCO <sub>2</sub> e]	-	-	1 605 429	2 857 805

# CONCLUSION

Les simulations thermiques dynamiques menées dans le cadre du projet CLIMAYOTTE, ont permis d'apporter des éléments complémentaires pour adapter la conception bioclimatique des bâtiments mahorais, face aux enjeux actuels et futurs du climat. En intégrant les évolutions climatiques local, elles ont permis d'analyser la sensibilité des bâtiments aux différents paramètres de conception et d'identifier des pistes d'optimisations, favorisant à la fois le confort thermique des occupants et la réduction des besoins froids. Plusieurs enseignements émergent de l'analyses de ces simulations :

## (1) Impact du changement climatique à l'horizon 2070 :

- A l'horizon 2070, pour le scénario RCP 4.5, les besoins en climatisation augmenteraient jusqu'à +25%, même pour des conceptions dites performantes, ces augmentations sont moins importantes pour des usages à forte charges internes.
- Pour un fonctionnement passif, la température opérative moyenne devrait croître jusqu'à +1,8°C et les taux d'inconfort augmenteront sensiblement jusqu'à +25%, accentuant la sensation d'inconfort, en particulier dans les locaux à forte charges internes (salle de classe et open-space).

## (2) Influence des paramètres de conception sur l'atteinte du confort :

- L'isolation thermique réduit significativement les besoins en climatisation.
- Les protections solaires performantes ( $C_m \leq 0,3$ ) sont essentielles pour limiter les apports solaires et garantir un confort thermique (mode passif et actif) et une réduction des besoins froids (mode actif).
- La gestion de la porosité et du renouvellement d'air joue un rôle clé : une porosité importante sur deux façades opposées, favorise la ventilation naturelle, réduisant la sensation d'inconfort thermique, tandis que qu'une porosité trop importante augmente les besoins en froid.

## (3) Identification des conceptions performantes en cas de climatisation :

- Les locaux climatisés doivent privilégier une faible porosité, une isolation adaptée des parois et des protections solaires performantes pour limiter les besoins froids.
- Les constructions en BTC montrent un comportement thermique plus favorable que celles en béton ou en ossature bois dans le contexte mahorais et un usage tertiaire.

## (4) Regard critique sur les conclusions par une application de cas et évaluation des potentielles économies

- Les applications de cas sur le collège de Ouangani et la Technopole de Dembeni confirme les tendances issues des STD menées.
- Les optimisations proposées permettraient de réaliser des économies annuelles sur les coûts énergétiques et d'émission de CO<sub>2</sub> par rapport au cas tel que construit.

- Les STD menées comportent néanmoins des limites : elles n'intègrent les événements climatiques extrêmes (cyclones, vagues de chaleur...) ni la variabilité des comportements des occupants (sensibilité aux dispositifs passifs, bonnes/mauvaises pratiques des équipements passifs...), facteur susceptible d'influer sur le confort thermique et les consommations énergétiques,
- Des études complémentaires peuvent être menées afin d'affiner les observations et de continuer à adapter la conception bioclimatique au climat : prise en compte d'autres indicateurs bioclimatiques comme la végétalisation, l'application de l'étude au secteur résidentiel...

