

# La simulation thermique dynamique appliquée à la rénovation d'un bâtiment selon le standard passif

Etudes des limites par rapport à une étude statique

Mémoire présenté par  
**Adrien Bouquiaux**

en vue de l'obtention du grade de master en  
**Ingénieur civil des constructions**

Promoteurs  
**Magali Bodart, Geoffrey Van Moeseke, Geoffroy Bekkers**

Lecteurs  
**Thomas Vandenberg, Olivier Dartevelle**

Année académique 2016-2017



## *Remerciements*

*Ce mémoire est le fruit d'un travail au terme de mes années d'études en Ingénieur civil. Je souhaite remercier les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.*

*Je tiens d'abord à remercier mes promoteurs Dr. Ir. Magali Bodart, Dr. Ir. Geoffrey Van Moeseke qui par l'encadrement fourni tout au long de cette année m'a permis de mener à bien ce travail.*

*Je tiens également à remercier l'Ir. Geoffroy Bekkers, project manager chez Besix qui m'a donné accès aux documents concernant le bâtiment de Besix et à la formation reçue sur le logiciel PHPP.*

*Merci à toute l'équipe d'Architecture et Climat qui m'a accueilli et mis à disposition toute l'infrastructure qui m'a permis de réaliser ce mémoire.*

*J'exprime également ma gratitude au Dr. Ir Thomas Vandenberg et à l'Ir Olivier Dartevelle d'avoir accepté d'être lecteurs de ce mémoire et de l'intérêt porté à ce sujet.*



## Résumé

*Au vu de l'évolution des exigences énergétiques sur la consommation des bâtiments en Europe, les outils qui permettent d'évaluer et de certifier ces bâtiments doivent être de plus en plus précis. Le bâtiment de Besix va subir une série de travaux de rénovation afin de diminuer sa consommation avec comme objectif : atteindre le critère passif.*

*L'objectif de ce travail est de comparer une étude statique (PHPP) et une étude dynamique (TRNSYS) sur ce bâtiment avant et après rénovation. Nous allons mettre en évidence les différences entre ces études, nous allons étudier les surchauffes dans certains locaux et réaliser une simulation dynamique avec l'ensemble des travaux réalisés afin de représenter le comportement le plus réaliste possible du bâtiment. Nous étudierons toute une série de propositions théoriques afin de montrer les influences dans le bâtiment.*

*Les résultats de ce travail mettent en lumière l'influence des parois qui stockent l'énergie dans le comportement du bâtiment, cette influence n'est pas prise en compte dans la certification passive réalisée avec le PHPP. L'étude statique réalise toute une série de simplification notamment dans les gains internes qui influence le résultat final des besoins en énergies. Après avoir étudié trois locaux aux profils différents dans le bâtiment, nous pouvons conclure qu'à mesure où le bâtiment devient passif, chaque local se comporte de plus en plus différemment. L'influence des gains internes et solaires a une importance grandissante et doit être mieux évaluée. Les surchauffes ne se produisent pas uniformément dans le bâtiment, les locaux denses et avec une orientation engendrant une exposition importante au soleil souffrent particulièrement de ce problème.*

*Après paramétrage des modifications au niveau de la ventilation et de l'isolation du bâtiment dans les logiciels, les économies réalisées ne sont pas optimales. Nous avons dès lors étudié l'influence des protections solaires et du free cooling afin de diminuer les besoins énergétiques du bâtiment. Ces études théoriques ont permis de mettre en évidence tout le bienfait de ces techniques dans l'optimisation énergétique du bâtiment.*



## Table des matières

Introduction .....	5
Notations et abréviations utilisées .....	7
Chapitre 1 – Mise en contexte du mémoire et présentation du concept passif.....	9
Critères passifs .....	9
Conception d'un bâtiment passif.....	11
Surchauffe dans les bâtiments .....	12
Objectif du mémoire.....	14
Chapitre 2 – Description du bâtiment de Besix.....	15
Chapitre 3 – Description des logiciels PHPP et TRNSYS .....	19
Descriptions du logiciel PHPP .....	19
Descriptions du logiciel dynamique .....	19
Explications du modèle dynamique.....	21
Comparaison des logiciels PHPP et TRNSYS .....	22
Chapitre 4 – Analyse de la situation initiale : modèle 1 .....	25
Modèle 1.A : Hypothèses du PHPP.....	25
Modèle 1.A : Résultats .....	27
Modèle 1.A : Analyse.....	28
Modèle 1.B : Hypothèses révisées.....	29
Modèle 1.B : Résultat.....	31
Modèle 1.B : Analyse.....	32
Modèle 1.B : Etudes des températures .....	33
Chapitre 5 – Analyse de la situation rénovée : modèle 2 .....	39
Modèle 2.A : Ventilation sans free cooling.....	40
Modèle 2.A : Résultat.....	41
Modèle 2.A : Analyse.....	41
Modèle 2.B : Ventilation avec free cooling mécanique .....	41
Modèle 2.B : Résultat.....	42
Modèle 2.B : Analyse.....	42
Situation par rapport au critère passif du modèle 2.B .....	43
Chapitre 6 – Développements des solutions.....	47
Proposition 1.....	47
Proposition 2.....	50
Proposition 3.....	50
Proposition 4.....	52
Mise en commun des propositions .....	53

Autres types de solutions.....	54
Chapitre 7 – Conclusion.....	55
Sources Bibliographies.....	57
Chapitre 8 – Annexes.....	59
Annexe 8.1 : Systèmes de ventilation.....	59
Système de ventilation naturelle : Système A.....	59
Système de ventilation mécanique simple flux : Système B et C.....	60
Système de ventilation mécanique double flux : Système D.....	61
Annexe 8.2 : Détails élévation Nord-Est.....	63
Annexe 8.3 : Schéma aéraulique.....	64
Annexe 8.4 : Panneau photovoltaïque.....	65

## Introduction

L'économie de l'énergie et des ressources de la planète est devenue au fil des années une priorité dans notre façon de penser. En effet les crises énergétiques se sont succédées ces dernières années. Dans un souci de diminuer notre dépendance à ces énergies et notre empreinte énergétique sur la planète, nous ne devons plus construire comme avant, nous devons construire durablement, plus intelligemment.

L'effet de l'homme dans les émissions de gaz à effets de serre est un fait établi et la consommation des bâtiments dans nos villes représente 24 % de ses émissions et 44 % de notre consommation énergétique [1]. La production de chaleur en est la principale cause. La consommation en énergie des bâtiments est responsable de l'augmentation de la concentration en particules fines dans nos villes. La température dans nos villes est aussi influencée par les dégagements de chaleur des bâtiments [2].

Même si nous construisons durablement maintenant, nous avons beaucoup de bâtiments déjà construits dans nos villes qui consomment énormément d'énergie. Ce patrimoine doit être incorporé dans notre vision à long terme, en se posant la question : devons-nous détruire ces bâtiments pour en construire des nouveaux ou alors se lancer dans l'étude de rénovations de ceux-ci afin qu'ils atteignent de meilleures performances énergétiques ? Dans l'optique d'économies de ressources et d'énergies, le fait de rénover semble plus judicieux. De plus, la rénovation d'un bâtiment est plus rapide et moins coûteuse que la démolition et la reconstruction de celui-ci [3].

Les technologies existent et sont prêtes à être mise en œuvre. La Belgique a défini des réglementations thermiques sous forme de plans d'action. Ces plans existent depuis de nombreuses années et ils ont été progressivement mis en œuvre dans l'imposition de normes. En mai 2010, des valeurs de coefficient thermique ont été imposées afin d'isoler correctement les parois d'un bâtiment. Ensuite d'autres valeurs plus contraignantes ont été conseillées afin d'atteindre soit le niveau « basse énergie » ou le niveau « standard passif ». A terme, l'objectif est d'atteindre la norme NZEB fixé par l'Europe [4]. Cependant, il reste encore beaucoup de chemin à parcourir avant d'atteindre ces objectifs. Le milieu de la construction est un milieu où le changement se passe très lentement.

Actuellement lors d'une nouvelle construction ou d'une rénovation, le volet « Travaux PEB » de la réglementation PEB prévoit plusieurs exigences à respecter. Le but de cette réglementation PEB est d'améliorer les performances énergétiques. Les points concernés par cette réglementation sont l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment, les caractéristiques techniques des installations, la ventilation, l'étanchéité,... [4]

En Belgique nous utilisons un outil appelé PHPP « Passive House Planning Package ». Cet outil utilisé dès la conception des projets est basé sur le tableur « Microsoft Excel ». Il est utilisé afin de réaliser les certifications des bâtiments passifs. C'est via cet outil que l'on donne le label passif ou non à un bâtiment. La PMP (plate-forme maison passive asbl) est en charge de la délivrance des certifications [4].

Cependant, plus les bâtiments tendent vers le passif, plus une série de données et d'hypothèses ont une grande influence lors du calcul. Certains locaux ont un comportement thermique très différent du comportement de l'ensemble du bâtiment [5]. La méthode statique réalisée avec le PHPP ne tient pas compte du stockage de chaleur des matériaux, il ne représente plus le comportement réel du bâtiment [6]. C'est pourquoi des études dynamiques sont réalisées en parallèle afin d'améliorer la précision de l'étude thermique. D'ailleurs lors d'une certification passive d'un bâtiment tertiaire, une simulation dynamique doit être réalisée afin d'évaluer le nombre d'heures de surchauffe (Chapitre 1). L'aspect dynamique tient compte de l'évolution dans le temps de toute une série de données contrairement au PHPP qui utilise des valeurs moyennes [6]. Ces études dynamiques bien que plus complexes mettent en évidence une série d'éléments permettant une meilleure simulation du comportement thermique du bâtiment.

Dans les chapitres suivants, nous allons tout d'abord exposer le sujet d'études et son contexte en faisant le lien avec la conception des bâtiments passifs et leurs réalisations. Nous énumérerons les critères à respecter et les tests à réaliser. Nous détaillerons chaque secteur où des améliorations peuvent être fournies. En second lieu, nous décrirons le programme utilisé (TRNSYS) afin de réaliser l'étude de notre cas. Nous donnerons ses avantages et ses inconvénients et nous le comparerons au modèle statique PHPP. Nous expliquerons le bâtiment étudié, ses atouts et ses inconvénients. Nous détaillerons chaque modèle réalisé et présenterons chaque point important influençant le comportement thermique. Ensuite nous comparerons le modèle statique et dynamique du bâtiment afin de juger la fiabilité des programmes et mettre en évidence les paramètres influençant les différences. Nous continuerons avec l'analyse dynamique du bâtiment rénové et évaluerons son critère passif. Différentes propositions seront faites afin d'optimiser le bâtiment et chacune d'entre elles sera analysée. Une attention particulière sera faite à propos des surchauffes calculées lors de cette rénovation et nous étudierons différentes stratégies connues réalisables ou non réalisables dans notre cas d'étude.

## Notations et abréviations utilisées

$\lambda$	conductivité thermique d'un matériau [ $W/mK$ ]
$U$	coefficient de transmission thermique d'une paroi [ $W/m^2K$ ]
$U_g$	coefficient de transmission thermique du vitrage [ $W/m^2K$ ]
$U_f$	coefficient de transmission thermique du châssis [ $W/m^2K$ ]
$U_w$	coefficient de transmission thermique de la fenêtre (ensemble châssis et vitrage) [ $W/m^2K$ ]
$g$	facteur solaire. Le facteur solaire d'une fenêtre est le rapport entre l'énergie solaire entrant due au rayonnement dans le bâtiment et l'énergie solaire reçue à la surface extérieure de la fenêtre [%]
$n_{50}$	Taux d'infiltration d'air sous une différence de pression de 50 Pa [ $h^{-1}$ ]
$C$	Capacité thermique massique d'un matériau [ $kJ/kg.K$ ]
$\rho$	densité d'un matériau [ $kg/m^3$ ]
Blower-door test	Mesure la perméabilité du bâtiment grâce à un appareil en créant une dépression ou une surpression.
NZEB	« Nearly zero-energy buildings » Bâtiment consommant très peu d'énergie, celle-ci doit être produite par des énergies renouvelables. Objectif à atteindre pour fin 2020 fixé par l'Europe.
Compacité	Rapport le volume protégé d'un bâtiment (chauffé) et la surface de déperdition (l'enveloppe extérieure d'un bâtiment) : $C = V/A$
PHPP	« Passive House Planning Package » Outil d'accompagnement à la conception de bâtiment passif ou basse énergie basé sur le tableur Microsoft Excel.
PMP	« Plate-forme maison passive » Organisation sans but lucratif qui vise à encourager la réalisation de bâtiment à très haute efficacité énergétique. Elle a comme objectifs de sensibiliser et former tout public candidats à la construction mais aussi de faciliter, certifier et développer tout projet à hautes performances techniques.
Puissance crête	Puissance dans des conditions standards. La puissance crête d'un système photovoltaïque correspond à la puissance électrique délivrée par ce même système dans des conditions standards d'ensoleillement ( $1\ 000\ W/m^2$ ) et de température ( $25\ ^\circ C$ ). [ $kWc$ ]
Niveau $E_w$	Niveau de consommation d'énergie primaire dans un bâtiment comprenant le chauffage, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires et la production de froid. Ce niveau est calculé suivant la procédure PEB, une valeur maximale à ne pas dépasser est imposée lors d'une construction neuve.

TRNSYS            Logiciel de simulation dynamique utilisé lors de l'étude de projets de bâtiments passif. Très utilisés dans le monde universitaire, il permet entre autres d'évaluer les surchauffes dans les bâtiments tertiaires.

HVAC              Raccourci pour parler des différents systèmes dans un bâtiment (Chauffage, ventilation et refroidissement).

## Chapitre 1 – Mise en contexte du mémoire et présentation du concept passif

Le propriétaire du bâtiment occupé par l'entreprise générale de construction Besix a décidé de réaliser des travaux de rénovation afin de faire de son bâtiment, un bâtiment atteignant le standard passif. Pour se faire il a demandé à un bureau d'études de réaliser le PHPP du bâtiment afin d'évaluer ses performances énergétiques. L'entreprise Besix a proposé comme sujet de travail de fin d'études de réaliser en plus de la simulation statique une simulation dynamique du bâtiment afin d'estimer les consommations d'énergie du bâtiment et l'influence des rénovations sur celui-ci.

Ce mémoire se concentre sur l'étude thermique d'un bâtiment rénové essayant d'atteindre la norme « standard passif ». Nous avons réalisé une étude dynamique d'une partie du bâtiment afin de calculer l'évolution temporelle de l'état thermique du milieu et de mettre en évidence les problèmes de surchauffes rencontrés dans les bâtiments passifs. Dans un premier temps, nous réaliserons la simulation dynamique du bâtiment dans son état actuel et nous comparerons cette simulation dynamique avec la simulation statique réalisée avec le PHPP. Ensuite nous analyserons les rénovations prévues dans le bâtiment dans le but d'étudier les gains au niveau thermique et de confort obtenus. Nous réaliserons des optimisations via le modèle dynamique afin de démontrer les gains énergétiques réalisables en modifiant la gestion technique du bâtiment ou en ajoutant d'autres systèmes permettant des économies.

### Critères passifs

Suite aux engagements pris par l'Europe après l'élaboration du Protocole de Kyoto, le Parlement et le conseil de l'Union Européenne ont élaboré un plan d'action afin d'évaluer et optimiser les performances énergétiques des bâtiments. Ce plan impose entre autres à chaque Etats-Membres de déterminer « Des exigences minimales relatives à la performance énergétique des bâtiments neufs et des bâtiments existants faisant l'objet de travaux de rénovation importants » [5]. En Belgique, les autorités régionales ont tout d'abord chacune définie dans les années nonante leurs propres directives à atteindre. Ce n'est que respectivement en 2006 et 2008 que la région flamande, wallonne et Bruxelles-Capital se sont alignées à la réglementation PEB [5]. Elles ont dès lors défini le critère passif comme l'objectif à atteindre pour chaque nouveau bâtiment.

Il y a énormément de raison de réaliser des bâtiments passifs, nous allons en développer quelques-unes. Tout d'abord, les besoins en énergies dans les bureaux sont énormes et le prix des énergies fossiles est instable. C'est pourquoi, le meilleur moyen de ne pas ressentir cette forte fluctuation est d'en consommer le moins possible. La consommation du bâtiment diminue, cela a pour conséquence un gain non négligeable d'argent, l'effort réalisé est rentable.

La réalisation de bâtiments passifs est bénéfique pour la planète car nous diminuons notre empreinte écologique sur celle-ci. De plus, il y a une satisfaction personnelle d'occuper un bâtiment passif car nous vivons dans un lieu écologique et moins polluant. Les techniques existent et sont facilement applicables dans tous les types de bâtiments, si nous pouvons concevoir passif alors nous devons le faire. Les bâtiments passifs sont plus confortables que les autres car la température générale est plus stable [3]. Il n'y a plus de zones froides engendrant un inconfort dans certaines pièces, la température de celle-ci et la température des parois sont à des températures uniformes.

Concrètement, le niveau de performance d'un bâtiment dit « passif » doit respecter plusieurs critères. En premier les besoins en énergie nets de chauffage et de refroidissement doivent être inférieurs ou égaux à 15kWh/m<sup>2</sup>a. L'énergie primaire qui prend en compte l'ensemble des énergies du bâtiment en tenant compte des transformations nécessaires à la livraison de cette énergie, ne doit pas dépasser les (90 – 2,5 x compacité) kWh/m<sup>2</sup>a. Ces besoins doivent être mesurés via le logiciel PHPP. Ensuite, le taux de perméabilité à l'air  $n_{50}$  doit être inférieur ou égal à 0,6 h<sup>-1</sup>, ce taux doit être mesuré via un blower door test. Pour finir, le dernier critère à respecter dans le secteur tertiaire est le fait d'avoir un nombre d'heures où la température est supérieure à 25,5° C inférieurs à 5% du temps de travail. Ce critère doit être vérifié via une simulation dynamique [4].

Pour le moment en Belgique, la construction et la rénovation de bâtiments passifs sont en progression. Avec les objectifs donnés par l'Europe, le standard basse énergie ou très basse énergie ne suffit plus. A l'horizon 2019, « toutes les nouvelles habitations construites après le 31 décembre 2018 devront être en mesure de produire leurs propres énergies » [4]. En 2015 la Région Bruxelloise comptait près d'un million de mètres carrés de bâtiments passifs, cela représente une superficie deux fois plus grande qu'en 2010 [7]. La Belgique n'est pas dans la queue du peloton européen. Elle met en place via différentes stratégies d'aides financières et de sensibilisation une ligne de conduite afin d'avoir un patrimoine immobilier le plus propre possible.

A long terme, l'objectif est d'avoir un parc immobilier consommant le moins possible car la densité des villes est en constante augmentation, nous construisons toujours plus, toujours plus haut. Si nous voulons diminuer la présence de polluants dans nos villes, nous devons concevoir plus intelligemment. Le secteur de la construction est un grand acteur dans la production des émissions de gaz à effet de serre, le but est de diminuer au maximum l'empreinte écologique de la construction. Pour ce faire l'objectif fixé par l'Europe est de réaliser des bâtiments NZEB où toute la consommation est compensée par une ou plusieurs unités de production [4].

## Conception d'un bâtiment passif

Afin d'atteindre le standard passif, il est nécessaire d'améliorer les performances des bâtiments mais aussi d'adopter un comportement nouveau. L'isolation des parois est un point essentiel dans l'amélioration des performances. Le coefficient thermique des parois doit atteindre au maximum certaines valeurs comme représenté dans le Tableau 1. Une étanchéité à l'air minime est souhaitée dans le but de diminuer les pertes par infiltration et par ventilation. Cependant, avec ces changements apportés à l'enveloppe du bâtiment, le renouvellement d'air du bâtiment n'est plus assuré. L'air est en quelque sorte bloqué dans les locaux et l'accumulation de différents polluants (respiration, transpiration, animaux,...) devient problématique. Ce blocage engendre une diminution de la qualité de l'air intérieur et donc du confort des occupants [8]. Les différents polluants doivent être évacués via une ventilation hygiénique afin de garantir le bien-être et la santé des occupants. Cette ventilation peut engendrer de grandes déperditions par renouvellement d'air comparé aux autres déperditions par transmissions [9]. Une ventilation double flux (Système D) avec récupérateur de chaleur doit être prévue pour tous les bâtiments passifs (Annexe 8.1).

Parois de la surface de déperdition thermique du bâtiment	Valeurs conseillées afin d'atteindre le standard passif (15 kWh/m <sup>2</sup> a)
1. Fenêtres et autres parois translucides	
- Valeur globale pour l'élément	$U_{max} = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Valeur spécifique pour la partie centrale vitrée	$U_{max} = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
2. Portes	$U_{max} = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
3. Murs et parois opaques	$U_{max} = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$
4. Toitures et plafonds	$U_{max} = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$
5. Planchers	$U_{max} = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tableau 1 : Coefficients thermiques conseillés pour les parois dans les bâtiments passifs [3]

Une autre piste à développer afin d'atteindre le critère passif est l'optimisation de l'espace comme représentée sur la Figure 1. En effet, la contrainte des 15kWh/m<sup>2</sup>.an tient compte de la surface occupée. Une réflexion globale sur la superficie utilisée par les occupants doit être prise en compte lors d'une nouvelle construction ou d'une rénovation. C'est la façon la plus simple et économique de réduire la consommation d'un bâtiment.

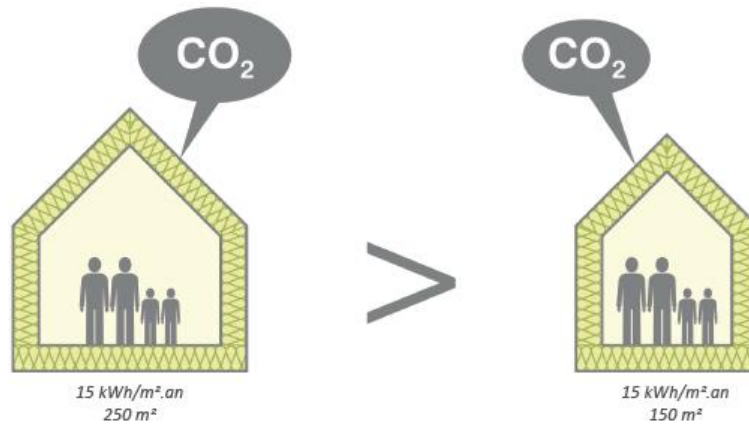


Figure 1 : Comparaison de la consommation en fonction de la surface (Architecture et Climat) [3]

## Surchauffe dans les bâtiments

La présence de surchauffes dans les bâtiments passifs est le principal problème de ceux-ci. La surchauffe est le dépassement d'une certaine température dans un local. Ce dépassement est autorisé au maximum pendant 5% du temps d'occupation du bâtiment. La surchauffe dans un bâtiment est un problème local. Selon certains critères, des locaux peuvent présenter des surchauffes et d'autres pas [5].

Ces critères sont :

- L'orientation du local
- Le type de parois des façades
- Les gains internes
- L'ensoleillement

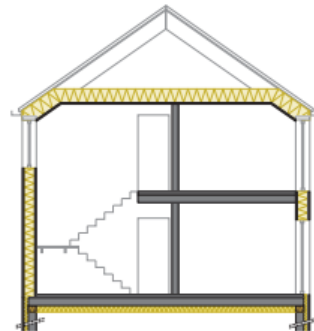


Figure 2 : maison à inertie faible [3]

Il existe différents moyens de combattre ces surchauffes, comme le choix des parois [3], la gestion des gains internes [10], les protections solaires [11] et la ventilation nocturnes [12]. Les bureaux ont souvent des façades vitrées, le choix d'un faible facteur g permet de minimiser les gains solaires. Des protections solaires comme des stores extérieurs permettent aussi de diminuer ces gains. Une autre technique consiste à réaliser une ventilation nocturne afin de refroidir le bâtiment. L'apport gratuit d'air extérieur permet de faire baisser la température dans les différents locaux [9].

Pour illustrer ces différentes démarches, nous allons reprendre l'étude des surchauffes réalisée pour une maison passive avec une inertie faible [3]. Les caractéristiques de cette habitation sont :

<b>Hypothèses</b>	
Surface : 150 m <sup>2</sup>	Bloc de béton cellulaire
Orientation arrière Sud	Isolant par l'extérieur (laine minérale)
Proportion de vitrages des façades : 20% de la surface au sol des pièces de vie	Plancher en béton
Ventilation double flux avec récupérateur de chaleur	Dalle de sol béton inaccessible à la chaleur
Gains internes suivant un profil quotidien avec une moyenne de 4,8 W/m <sup>2</sup>	Auvent de 1m de profondeur
Ventilation nocturne entre 22h et 7h si T° intérieur >22 °C et T° extérieur < 15 °C	Stores mécanique d'un facteur solaire g de 0,13 et d'un facteur d'ombrage de 95%

Tableau 2 : Caractéristique de l'habitation étudiée [3]

La faible inertie du bâtiment va engendrer des surchauffes, il faudra prévoir des stratégies afin de limiter ces surchauffes. Dans cette étude (Figure 3), les surchauffes ont été évaluées sans stratégies, avec différents types de protections solaires (PS) et ventilation nocturne (VN) faible et élevée. L'ajout d'un puit canadien a aussi été étudié.

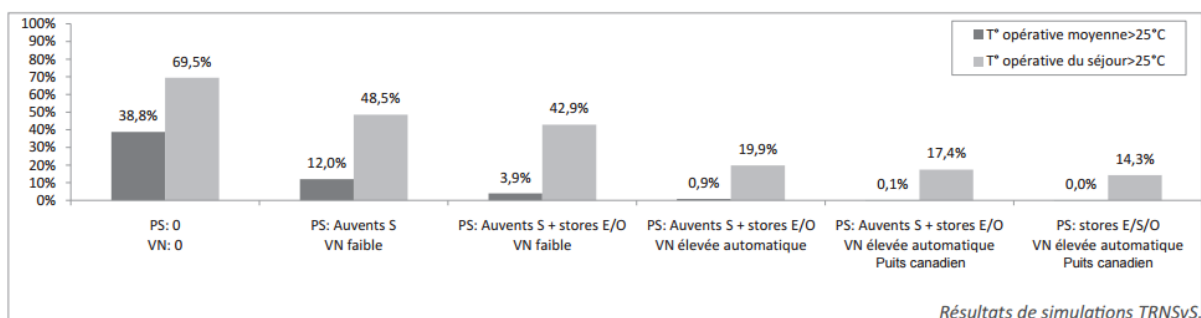


Figure 3 : Pourcentage du temps où la température est supérieure à 25 °C sur une année moyenne [3]

Le résultat de cette étude nous fournit plusieurs informations :

- Réaliser un bâtiment passif sans stratégies contre les surchauffes n'est pas envisageable
- La combinaison des stratégies permet de fortement améliorer le confort thermique
- La présence de surchauffes diffère en fonction des locaux

Si malgré toutes les dispositions prises, les surchauffes continuent à être dominantes dans le bâtiment ou dans certains locaux. Il faudra fournir une production de froid ce qui engendrera une augmentation de la consommation énergétique du bâtiment.

## Objectif du mémoire

Les objectifs de ce travail sont :

- Comparer les modèles statiques et dynamiques d'un même bâtiment avant et après rénovation afin de mettre en évidence les différences de ces deux méthodes.
- Identifier les causes de surchauffes présentes dans certains locaux du bâtiment et en donner les conséquences.
- Situer le comportement énergétique du bâtiment rénové par rapport au critère passif.
- Explorer diverses solutions techniques afin d'analyser leurs influences sur le comportement thermique et énergétique du bâtiment.
- Proposer une solution théorique afin d'atteindre de très bonnes performances énergétiques.

## Chapitre 2 – Description du bâtiment de Besix

Le sujet d'étude est le siège social de l'entreprise de construction générale Besix. Cet immeuble de bureaux situé à Woluwé Saint-Lambert a été construit en 1997. Il a été conçu par le bureau d'architecture Michel Jaspers & Atelier d'Art Urbain et construit par Besix. Ce bâtiment peut accueillir 320 personnes sur une surface totale de 6370 m<sup>2</sup>.

Il y a en moyenne 20 m<sup>2</sup> par employé. La surface minimale par employé à respecter varie entre 10 et 15 m<sup>2</sup> [13]. Le bâtiment est situé en périphérie du centre de Bruxelles et mesure 25 m de haut. Il est situé entre des bâtiments de même taille et des arbres. Il est composé principalement de murs rideaux mais aussi de bardages en granites, aluminiums et d'allèges vitrées.

Le système de ventilation est un système D sans récupérateur de chaleur, l'évacuation se passe principalement par les fenêtres et les locaux humides mais aussi par un transfert vers le garage comme illustré sur l'annexe 8.3 afin d'augmenter sa température.

La distribution de chaleur et le refroidissement des locaux sont assurés par un ensemble de ventilo-convecteurs. Les luminaires sont équipés en majorité de tubes fluorescents et sont constamment allumés pendant les heures où les employés sont dans le bâtiment.

Nous allons étudier le comportement dynamique d'un étage type. Nous avons choisi d'analyser la partie du deuxième étage situé perpendiculairement à l'Avenue des Communautés. Une image illustrant la situation est représentée sur la Figure 4. Ce choix a été motivé par la disposition de l'étage qui est la plus représentée dans le bâtiment.

Il est composé d'un grand open space et entouré de différents types de bureaux d'expositions différentes au soleil. De plus sa façade est composée de l'ensemble des bardages (granit, aluminium, vitrage) utilisé dans la construction du bâtiment. Les différents coefficients  $U$  des parois sont détaillés dans le Tableau 3 tandis que les fenêtres seront détaillées dans le Tableau 4.



Figure 4 : Visualisation de l'étage étudié

Type de parois	Composition (intérieur vers extérieur)	$U$ [ $W/m^2K$ ]
Allège vitrée	Tôle acier, laine de roche, tôle acier, vide, double vitrage	0,145
Bardage granit	Béton armé, laine de roche, vide, granit	0,185
Bardage aluminium	Tôle acier, laine de roche, tôle acier, vide, tôle aluminium	0,164
Plancher	Plancher préfabriqué, chape de compression, chape de finition	1,51
Cloison mitoyenne	Mur de bloc	1,151

Tableau 3 : Coefficients thermiques des différentes parois du bâtiment

Type de vitrage	$U_w$ [ $W/m^2K$ ]	$U_g$ [ $W/m^2K$ ]	$U_f$ [ $W/m^2K$ ]	$g$ [%]
Double vitrage	1,74	1,37	1,5	28

Tableau 4 : Coefficients thermiques des fenêtres existantes

Plus précisément, le modèle est composé d'un Open space nommé OP01 ayant une surface de plancher de 190 m<sup>2</sup> et pouvant accueillir selon les plans 22 travailleurs. Il est orienté Nord-Est et Sud-Est, il a une paroi adjacente à un bureau tandis que ses autres parois sont modélisées comme des parois frontières. Ces parois frontières sont considérées dans la simulation dynamique comme des parois adiabatiques. Elles n'ont aucune influence dans les gains ou pertes d'énergie. Le premier bureau appelé B01 est adjacent à OP01, il a une surface de plancher

de 23 m<sup>2</sup> pour maximum deux employés et il est uniquement orienté Sud-Est. Le deuxième bureau nommé B02 est un bureau pour une seule personne mais pouvant accueillir lors de réunions jusqu'à quatre personnes. Il a une surface de plancher de 21 m<sup>2</sup> et est exposé uniquement au Nord-Ouest. Un plan reprenant l'étage étudié est représenté sur la Figure 5

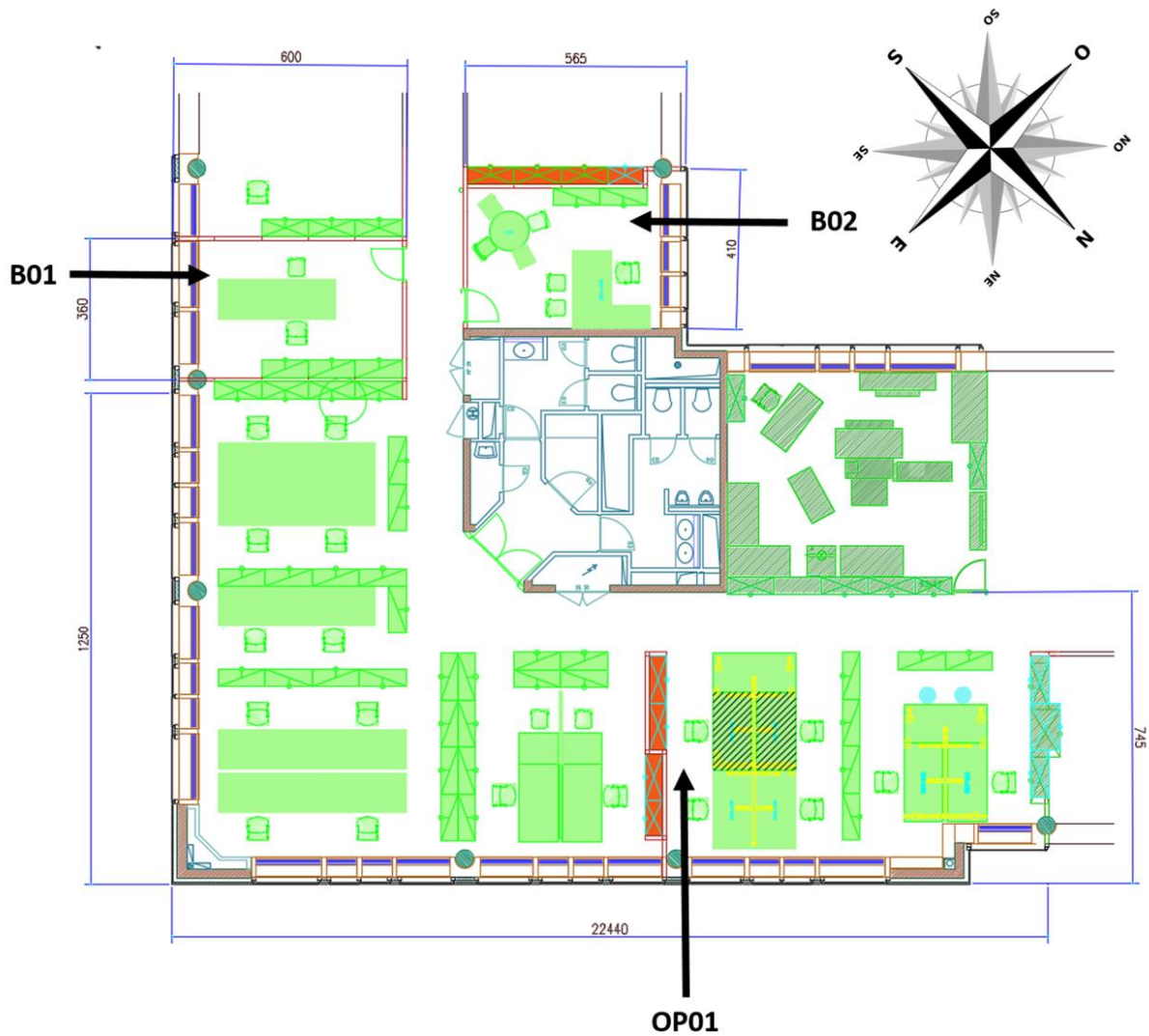


Figure 5 : Représentations des zones étudiées

Afin de respecter la norme NBN EN 13779 [14], chaque travailleur doit pouvoir disposer d'un débit d'air frais de 30 m<sup>3</sup>/h/travailleur. Dans notre étage la ventilation est assurée par deux différents types de bouche de pulsion de 65 m<sup>3</sup>/h et 80 m<sup>3</sup>/h. Nous avons détaillé la ventilation requise par la norme et fournie pour chaque zone dans le tableau suivant. Dans le local B02 le débit fourni est bien plus important que le débit requis. Ce local pouvant accueillir des réunions de quatre personnes, il doit pouvoir assurer la ventilation hygiénique nécessaire.

Zone	Débits requis par la norme [m <sup>3</sup> /h/travailleur]	Nombre de personnes	Débit total requis par la norme [m <sup>3</sup> /h]	Débits fournis par bouche de pulsion [m <sup>3</sup> /h]	Nombre de bouches	Débits totaux fournis [m <sup>3</sup> /h]
OPO 1	30	22	<b>1320</b>	65	11	<b>1430</b>
B01	30	2	<b>60</b>	65	1	<b>65</b>
B02	30	1	<b>30</b>	80	2	<b>160</b>

Tableau 5 : Débits pulsés dans les locaux en fonction de la norme et des plans

Le fichier météo mis à disposition pour l'étude est un fichier composé de 19 mois consécutifs et débutant au mois de juillet [14]. Il reprend entre autres les températures et l'ensoleillement de la station météorologique d'Uccle, ces données sont fournies gratuitement par l'IRM et sont accessibles à tous. La raison pour laquelle le fichier est composé de 19 mois alors que nous réalisons l'étude sur une année complète est la mise en état du bâtiment. En effet, il faut un certain temps afin que les températures des parois aient une influence dans le bâtiment et cette mise en état permet d'avoir une histoire des températures avant de réaliser l'étude. Le choix de 6 mois est simplement une question de facilité afin d'avoir une demi-année de mise en état. En plus de l'année complète où nous réalisons l'étude, il y a un mois de juillet caniculaire qui est incorporé au fichier. Ce mois ayant des températures dépassant les 30 degrés est pertinent afin d'étudier les risques de surchauffe dans le bâtiment. Sur la Figure 6, nous représentons les températures moyennes extérieures de l'étude.

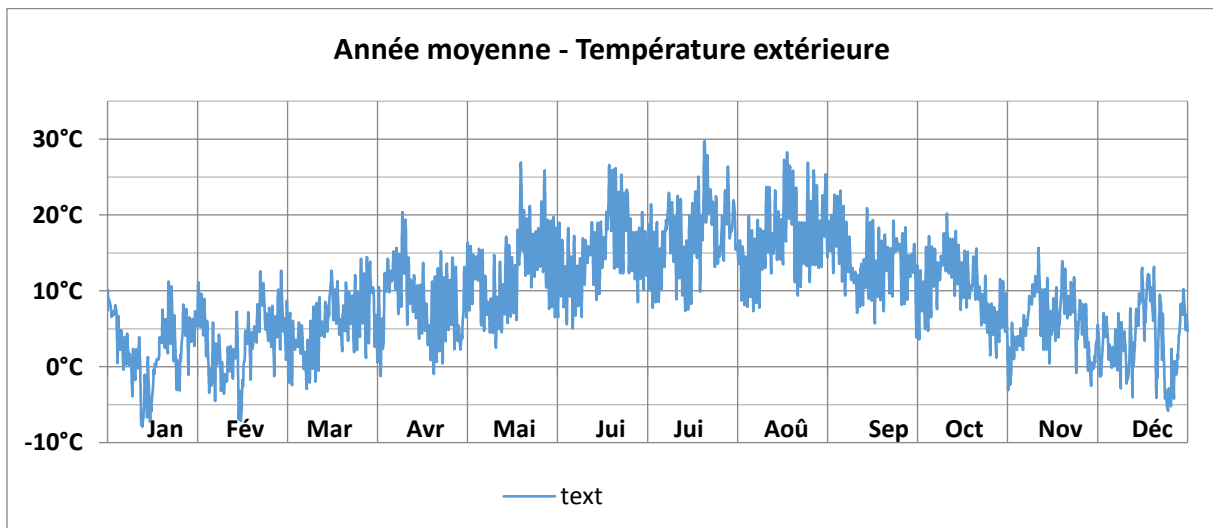


Figure 6 : Température extérieure d'une année du fichier météo [14]

## Chapitre 3 – Description des logiciels PHPP et TRNSYS

### Descriptions du logiciel PHPP

Le logiciel PHPP (Passive House Planning Package) est un outil servant exclusivement à l'élaboration de maisons passives. Créé par le PassifHaus Institut en 1998, il permet de réaliser des calculs thermiques de façon fiable et précise. En constante amélioration, les algorithmes de ce logiciel sont optimisés grâce à la comparaison à des cas pratiques. En effet il a été comparé à plusieurs centaines de constructions réalisées dont les consommations énergétiques ont été examinées [4].

Ce tableur Excel est composé d'une trentaine de feuilles de calculs, elles sont chacune consacrée à un calcul bien spécifique : coefficient thermique des parois, la ventilation, les gains solaires,... Il permet en analysant l'ensemble de ces données et en réalisant quelques interactions entre les différentes feuilles de calculs de définir les différents besoins énergétiques annuels en kWh/(m<sup>2</sup>a) qui sont les critères à analyser pour la réalisation d'une maison passive.

Il tient aussi compte de la mise en place de production énergétique du bâtiment comme les panneaux solaires, la géothermie,... Il propose une grande bibliothèque de châssis et chaque paroi peut être assez facilement modifiée. La facilité de modification est un atout indéniable à ce programme [6].

Le PHPP est la base sur laquelle la PMP réalise les certifications de bâtiments passifs, basse et très basse énergie. Il est indispensable afin d'obtenir les primes des régions Bruxelloise et Wallonne.

Outil simple à utiliser et efficace, le PHPP permet d'aider les bureaux d'études afin d'affiner les projets dont le but est d'atteindre le standard passif. Il peut ainsi remettre en question l'architecture du bâtiment afin de réaliser des économies d'énergie. C'est aussi un outil de réflexion qui permet d'optimiser les projets.

### Descriptions du logiciel dynamique

TRNSYS est un logiciel de simulation de dynamique, il a été développé au « Solar Energy Lab » dans l'université de Wisconsin dans le Madison et au « Solar Energy Application Lab » dans l'université du Colorado [15]. En premier lieu, il fut développé pour les systèmes solaires mais après sa commercialisation en 1975, une société allemande l'utilise pour créer un modèle de bâtiments multizone (TRNSYS Simulation Studio). Cet outil permet d'intégrer au mieux l'ensemble des caractéristiques des projets de construction tel que l'emplacement, les matériaux utilisés et l'architecture des bâtiments mais aussi les systèmes de chauffages, refroidissements et la climatisation dans le but de réaliser des simulations dynamiques. Il permet d'évaluer l'ensemble des consommations d'énergie, des températures dans chaque pièce mais aussi

d'identifier les surchauffes. TRNSYS gère parfaitement l'interaction de tous les systèmes et sous-systèmes d'un bâtiment mais aussi de l'influence des différentes zones entre elles. Ce programme a comme atout le fait d'avoir une large librairie qui est composée des derniers matériaux présents sur le marché. Nous utilisons TRNSYS pour réaliser une étude multi-zonale qui permet d'établir les interactions entre ces différentes zones. Même si les logiciels dynamiques peuvent être utilisés afin de réaliser une simulation en une seule zone, notre étude sera une multizone. Un des objectifs de notre travail est de mettre en évidence les interactions entre ces zones [16].

TRNSYS présente comme avantages [17] :

- Avoir beaucoup de documentations et feedbacks de réalisation
- Possibilités de modifier le code source soi-même afin de personnaliser son modèle
- La possibilité de faire des liens avec d'autres programmes comme Matlab, Excel, sketchUp
- Grande possibilité de définir la période de simulation : choix du pas de temps du début et à la fin de la simulation.
- Prendre en compte l'inertie du bâtiment et ainsi le stockage de chaleur qui s'y produit.

Mais TRNSYS comporte aussi quelques désavantages à tenir compte lors des hypothèses et interprétations des résultats.

- L'utilisateur doit introduire l'ensemble des données définissant les systèmes du bâtiment
- Simplification du gradient d'échange de chaleur par une approche standard de la température
- Pas de vérifications d'erreurs dans les surfaces et volumes entrés dans le programme

## Explications du modèle dynamique

Afin de simuler notre bâtiment dans le logiciel TRNSYS, nous avons utilisé une méthodologie comme illustré sur les figures suivantes. Ces figures représentent le schéma classique de nos différents modèles. Chaque modèle se base sur ce squelette, les différences se trouvent dans les formules de calculs utilisées, les différentes données à encorder et l'ajout d'une ou plusieurs cellules permettant de fournir de nouveaux résultats.

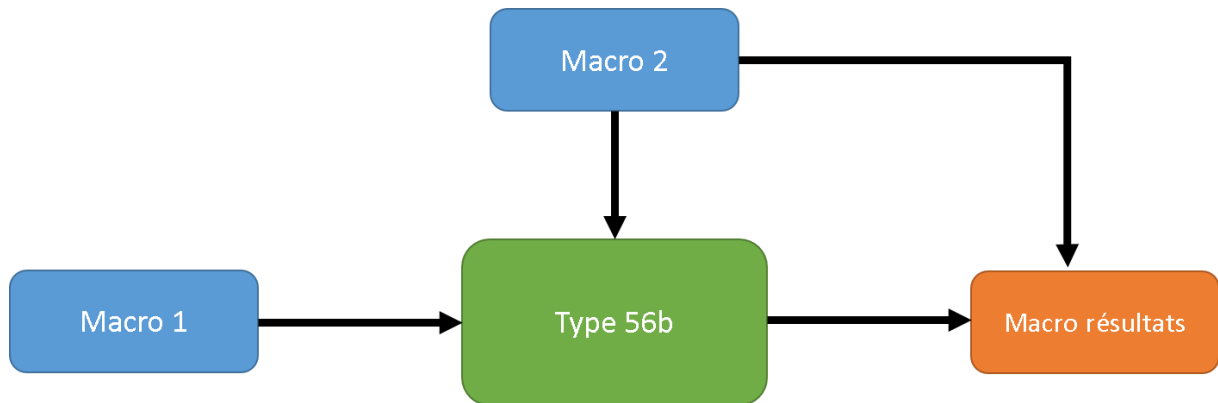


Figure 7 : Squelette TRNSYS des modèles utilisés

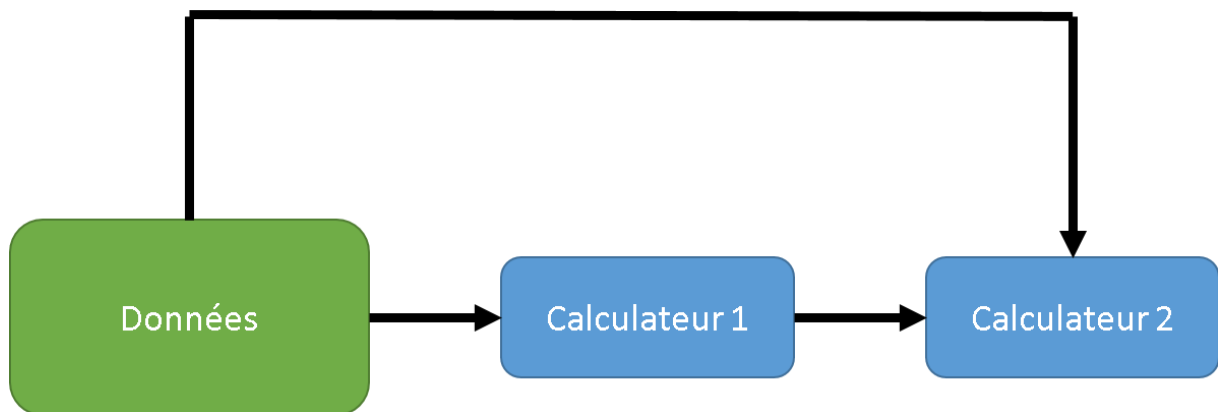


Figure 8 : Détails d'une macro type

Nous allons revenir sur certains éléments de ce schéma dans le but de faciliter la compréhension de la démarche. Les différents éléments importants dans ce squelette sont les macros que nous détaillons dans la Figure 8, les liens entre ces macros représentées par les flèches et le Type 56b.

Tout d'abord, nous reprenons chaque dispositif du bâtiment dans chaque macro. Elles sont généralement composées d'un fichier de données, d'un calendrier et d'un ou plusieurs calculateurs. Chaque macro a besoin d'un certain nombre d'inputs et donne comme résultats des outputs utilisés dans d'autres macros. Au final la macro résultats nous donne un fichier texte reprenant toutes les données utiles à l'analyse thermique et énergétique. Les liens entre ces macros sont représentés par des flèches et permettent la transition des résultats entre les macros. Chaque variable doit être correctement nommée et reliée car elles peuvent influencer tous les résultats des calculs. Enfin le Type 56b est un élément spécial du logiciel car c'est dans cette

partie que toutes les surfaces avec leurs compositions et orientations sont paramétrées. Elle fait aussi le lien entre les différentes zones. Elle reçoit énormément d'input comme les gains internes, les débits de ventilations, les besoins de chauffages et refroidissements,... Elle est le cœur du schéma du logiciel.

Le type shading mask de la simulation dynamique nous a permis d'incorporer les zones d'ombrages dans notre modèle. En effet, nous avons pris un point de référence au milieu des fenêtres et nous avons fait varier l'amplitude de l'angle solaire en fonction des obstacles se trouvant à proximité. Ce point a été pris au milieu de chaque surface extérieure de chaque zone. Comme l'ensoleillement a une énorme influence dans les apports d'énergie, cette cellule devait être particulièrement précise, c'est un des atouts de la simulation dynamique qui permet d'avoir des résultats plus précis [18].

La puissance de chauffe et de froid fournie dans les locaux est supposée infinie, nous sommes dans un souci d'analyse de comportement et non pas de dimensionnement. Nous ne tenons pas compte des systèmes avec leurs puissances installées. C'est justement via les résultats que nous fournira notre modèle que les installateurs pourront dès lors dimensionner leurs appareils. Nous supposons donc qu'il n'y a pas de contrainte de temps dû à la puissance des radiateurs. Les températures de consignes seront définies dans cette partie et seront différentes en fonction de chaque local car ceux-ci ont des expositions, gains internes et dimensions différents.

### Comparaison des logiciels PHPP et TRNSYS

Les atouts de la simulation dynamique par rapport à une simulation statique comme PHPP sont multiples. En effet, notre modèle dynamique prend en compte l'évolution de l'ombrage des bâtiments voisins et donne une meilleure estimation des interactions entre les différents systèmes HVAC car nous réalisons une étude multi-zonale [6]. Il permet aussi de donner les températures dans chaque zone ce qui met en évidence les zones critiques du bâtiment.

Sa gestion dans le temps incluant les weekends permet de prendre en compte un refroidissement ou un réchauffement non négligeable du bâtiment. En effet contrairement au PHPP, TRNSYS tient compte de l'inertie du bâtiment. Cette inertie permet un stockage de chaleur qui sera redistribué dans le temps, le comportement thermique en sera influencé. De plus le PHPP utilise une série de valeurs moyennes comme la température extérieure mensuelle alors que TRNSYS utilise une température variant chaque heure [19].

Il permet aussi de facilement tester des hypothèses d'optimisation thermiques dans le bâtiment. La complexité du logiciel permet de pouvoir réaliser des études précises de chaque local du bâtiment, on peut conclure que l'analyse dynamique est une analyse multi-zonale. Dans une simulation statique, le fait de ne pas prendre en compte ces hypothèses induit une surestimation ou une sous-estimation des consommations énergétiques. Même si les concepteurs sont conscients des limites de ce programme et ne l'utilisent pas pour le dimensionnement, il y a

toujours un risque que le comportement réel ne soit pas le même que celui calculé via le PHPP. Le problème de l'analyse statique qui est une analyse globale qui ne tient pas compte des locaux pouvant avoir un comportement différent de l'ensemble du bâtiment, certains locaux peuvent présenter plus de surchauffes que d'autres [5]. Le réel avantage du PHPP se trouve dans sa facilité d'utilisation et rapidité de mise en place.



## Chapitre 4 – Analyse de la situation initiale : modèle 1

La première étape du travail a été de modéliser le bâtiment tel qu’il se présente avant rénovation. Les caractéristiques des parois, des gains et des systèmes techniques sont identiques à celles introduites dans le PHPP. L’objectif était de vérifier si les valeurs de besoin de chaleurs et de besoin de refroidissements calculés via TRNSYS sont dans le même ordre de grandeur que celle du PHPP sachant que les méthodes de calcul sont différentes. Grâce au modèle TRNSYS nous pourrions aussi identifier les différents moments de surchauffes dans le bâtiment et en identifier les causes afin de fournir un moyen d’y remédier. Ce dernier résultat n’étant pas établi dans le PHPP, TRNSYS nous permet de donner une caractéristique supplémentaire au bâtiment.

Dans cette première étape, les hypothèses prises par les calculs TRNSYS sont identiques à celles prises dans le calcul du PHPP de manière à ce que les différences de résultats soient uniquement dues à la différence d’algorithme de calcul entre les deux logiciels.

### Modèle 1.A : Hypothèses du PHPP

Pour commencer, les différentes parois du bâtiment ont été simulées de la même manière dans les deux programmes afin d’avoir les mêmes caractéristiques telles que l’épaisseur et le coefficient thermique U. Ces différents coefficients ont été établis via les plans de détails. Elles sont référencées dans le Tableau 3 et le Tableau 4.

Le PHPP considère que les apports internes de 3,5 W/m<sup>2</sup> sont répartis sur 334 jours. Ensuite, via l’équation suivante, le PHPP calcule une énergie de 28,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) qu’il considérera comme un apport fixe de gains internes. Voici le détail du calcul avec les différentes hypothèses :

$$24 \cdot 334 \cdot 3,5 \cdot 0,001 = 28,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$$

Avec :

- 24 : le nombre d’heures prises en compte par jour [h/d]
- 334 : le nombre de jours pris en compte sur une année [d/a]
- 3,5 : la puissance spécifique [W/m<sup>2</sup>]
- 0,001 : coefficient afin de fournir la réponse en [kW]

Le fait de tenir compte d’une utilisation de 24h par jour et ce pendant 334 jours sur une année semble aberrant. Cependant, l’estimation sortant de ce calcul se rapproche de la réalité. Ces deux derniers paramètres ont été modifiés de façon empirique. Un calcul aussi rigide n’est pas possible dans le logiciel TRNSYS, nous avons donc réparti de façon uniforme les 28,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) selon le profil journalier. Dans la Figure 9 et la Figure 10, nous montrons la répartition des gains sur une journée dans le PHPP et TRNSYS. Nous constatons la différence de calcul entre les deux programmes.

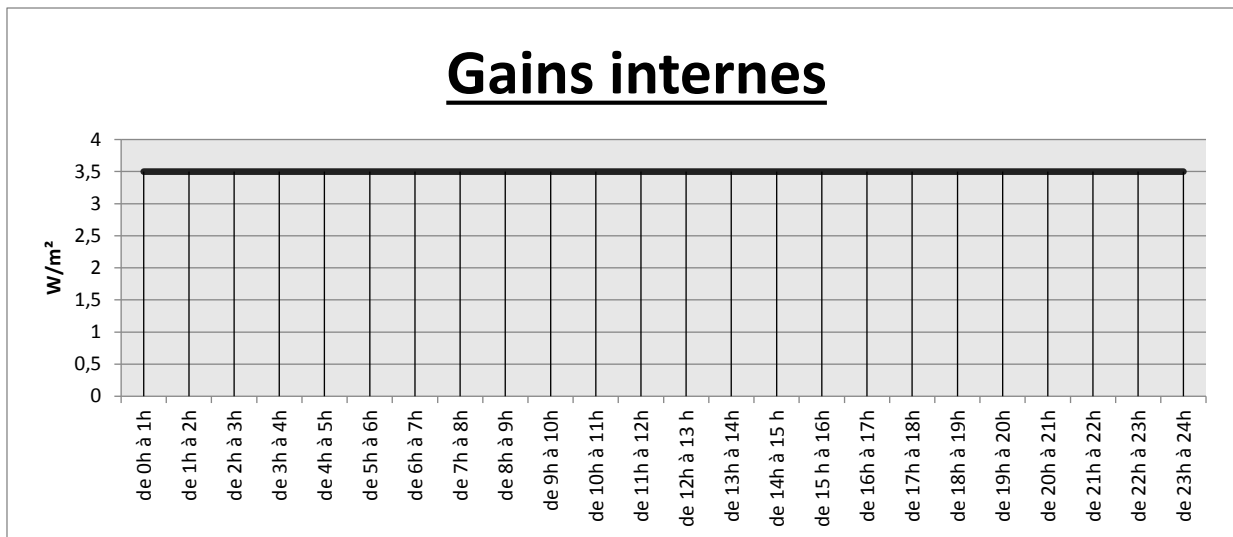


Figure 9 : Puissance selon les hypothèses du PHPP répartie sur la surface des locaux lors d'une journée

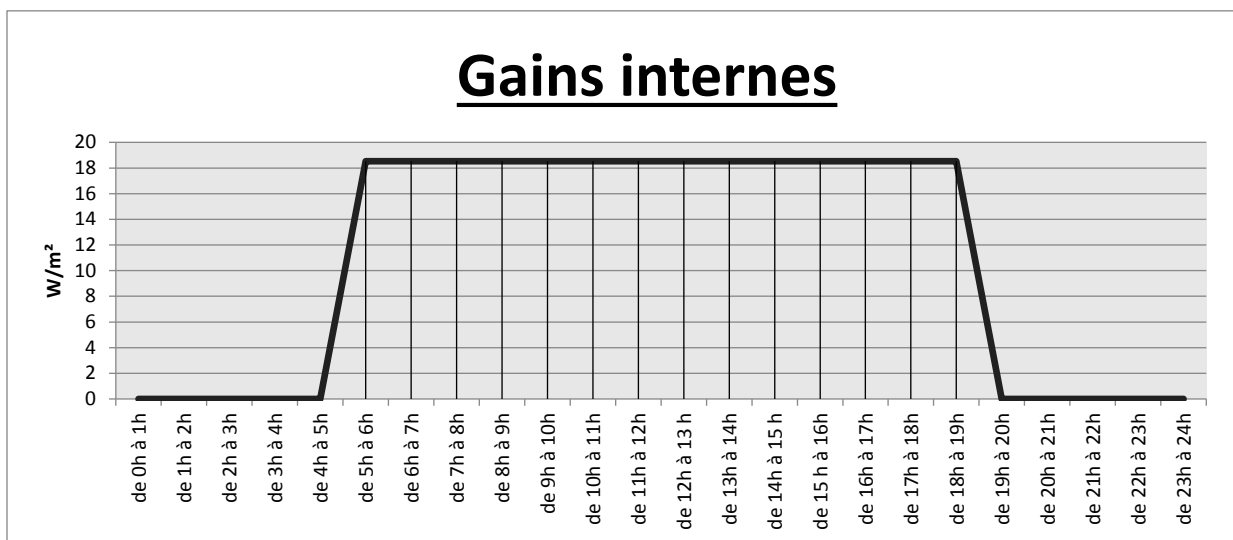


Figure 10 : Puissance répartie sur la surface des locaux lors d'une journée dans la simulation dynamique

Les hypothèses de ventilation dans le PHPP sont :

- 20 m<sup>2</sup> de surface par employé
- 30 m<sup>3</sup> par heure et par employé
- Système B pour la ventilation
- Ventilation de 10h par jour

La Figure 11 représente le débit d'air pulsé dans l'ensemble des locaux à chaque moment de la journée. Le même débit est pris en compte dans les deux programmes.

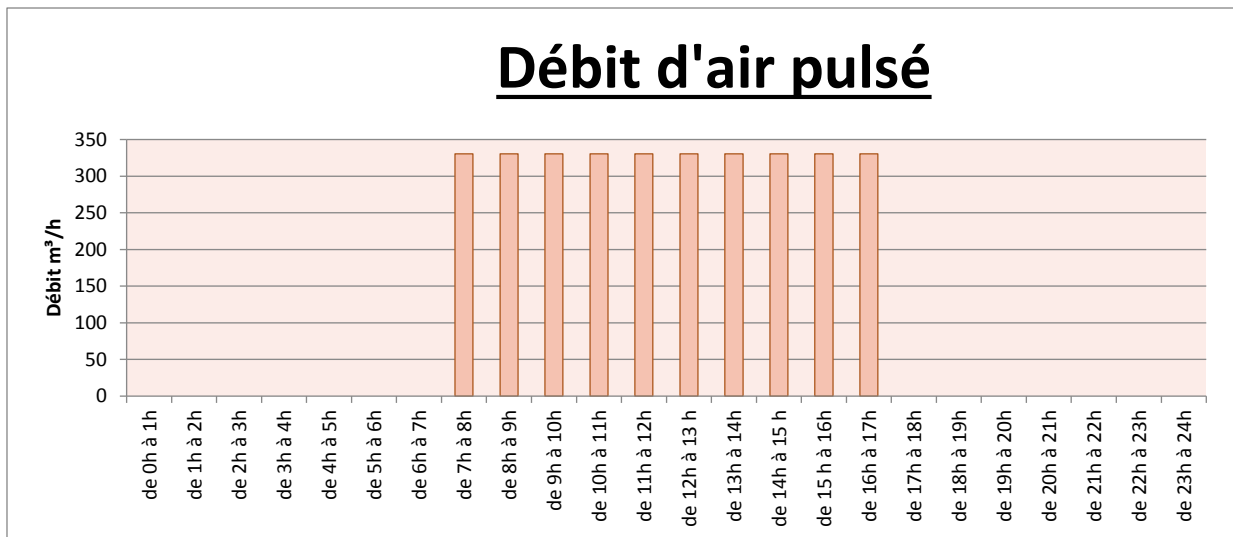


Figure 11 : Débit d'air pulsé dans l'ensemble des locaux pendant une journée

La température de consigne dans le PHPP est fixée à 20°C en hiver comme en été et se base sur la température ambiante. Nous avons établi dans chaque local de notre simulation dynamique une température de consigne de 20 °C. Dans les deux modèles, le fichier météo est basé sur les données de la station météorologique d'Uccle.

Les différentes hypothèses expliquées précédemment sont celles qui influenceront les besoins de chaleur et de froid du bâtiment. Nous avons paramétré toutes ces hypothèses dans TRNSYS afin de comparer les résultats.

### Modèle 1.A : Résultats

Afin de réaliser la comparaison des besoins énergétiques calculés via le PHPP et notre modèle TRNSYS, nous nous sommes basé sur les deux caractéristiques établies calculées dans le PHPP : les besoins de chaleur de chauffage (Besoin de chaleur) qui regroupent la chaleur à fournir pour compenser les pertes des parois et aérauliques et la demande totale de refroidissement (Besoin de refroidissement) à fournir afin de maintenir une température de confort correct en été.

Ce Tableau 6 donne les besoins de chaleur et de refroidissement pour l'entièreté du bâtiment ramené au m<sup>2</sup>, sur une année complète calculée par le PHPP.

<b><u>PHPP</u></b>	
Besoin de chaleur	30,76 [kWh/m <sup>2</sup> a]
Besoin de refroidissement	18 [kWh/m <sup>2</sup> a]

Tableau 6 : Résultat énergétique du PHPP (modèle 1.A)

Le Tableau 7 reprend les besoins en chaud et en froid de chaque local, pris séparément, pour une année entière, calculée par TRNSYS.

<b>TRNSYS</b>			
Zone	Besoin de chaleur [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de refroidissement [kWh/m <sup>2</sup> a]	Surface [m <sup>2</sup> ]
OP01	12,8	32	197
B01	15,4	35,7	23
B02	22	20,1	21
<b>Total</b>	<b>13,8</b>	<b>31,3</b>	<b>241</b>

Tableau 7 : Résultat énergétique de TRNSYS (modèle 1.A)

### Modèle 1.A : Analyse

En analysant ces deux tableaux, nous pouvons constater de grandes différences dans les résultats finaux. Le besoin de chaleur calculée par TRNSYS est presque deux fois moins important que celui calculé par le PHPP alors que le besoin de refroidissement calculé par TRNSYS est nettement supérieur à celle calculé par le PHPP.

La différence dans le besoin de chaleur de chauffage peut s'expliquer pour plusieurs raisons. Pour commencer, dans la simulation dynamique, nous n'avons étudié que 240 m<sup>2</sup> sur les 6370 m<sup>2</sup> du bâtiment, cela ne représente qu'une partie de la surface totale. De plus, la majorité de cette partie (OP01) est assez bien exposée au soleil ce qui diminue les besoins de chaleur. La seconde raison trouve son origine dans les parois du modèle 1.A. Comme nous étudions le deuxième étage, nous ne tenons pas compte des déperditions dues à la toiture et au plancher. Au final les parois de notre modèle dynamique sont assez bien isolées. Avec un regard critique de ces raisons, nous pouvons établir que nos besoins de chaleurs seront supérieurs à ceux indiqués. De plus, le PHPP calcule assez bien ces besoins, ce n'est pas là où il y a généralement des problèmes [20].

La différence en besoin de refroidissement met en évidence un des problèmes de la simulation statique : la sous-estimation des surchauffes. TRNSYS répartissant mieux les apports internes tout au long de la journée, elle simule mieux l'influence de ceux-ci. Ce résultat met aussi en évidence un constat fréquemment entendu, l'énergie à fournir afin de refroidir les bâtiments est conséquente.

Cependant, les résultats de la simulation dynamique sont à prendre avec un certain recul. En effet, nous nous sommes basés sur les hypothèses prises dans le PHPP. Il y a un certain nombre de problèmes dans ces hypothèses que nous allons énumérer dans la partie suivante. La

prochaine simulation dynamique reprendra comme hypothèses les données réelles du bâtiment fourni par les plans, les relevés sur site, les différentes fiches techniques et les documents mis à disposition.

### Modèle 1.B : Hypothèses révisées

Pour détailler ce modèle, nous allons reprendre toutes les hypothèses énumérées au modèle 1.A précédent et en expliquer les différences.

Nous n'avons apporté aucune différence aux parois utilisées, donc nous nous basons toujours sur le Tableau 3 et le Tableau 4.

Un des objectifs de ce travail est de simuler au mieux le comportement énergétique du bâtiment. Pour ce faire, nous devons avoir une idée précise de la présence ou non du personnel dans les locaux. Grâce aux documents fournis par Besix nous donnant le nombre d'employés à chaque heure de la journée et la consommation de chaque ordinateur et luminaires, nous avons pu simuler une journée type dans l'établissement.

Nous avons élaboré une année classique en tenant compte des week-ends. Chaque zone a un taux d'occupation différent, une attention particulière a été prise dans l'élaboration du profil de BO2. Même si ce bureau est un bureau individuel, il peut accueillir des réunions comprenant jusqu'à quatre autres personnes. Ces personnes auront une influence dans le confort thermique de la pièce.

Chaque travailleur dégage une certaine chaleur, à cela il faut aussi rajouter la chaleur émise par les ordinateurs et les luminaires. Nous avons tenu compte de la mise en veille des machines lorsque les employés ne sont plus présents. Cependant, les lumières étant constamment allumées pendant toute la journée de travail, leurs influences doivent être prises en compte même en cas d'absence. Toutes ces données ont pu être incorporées dans notre modèle TRNSYS. Le Tableau 8 nous montre les différences puissances en fonction des locaux et la Figure 12 nous fournit la répartition journalière des gains internes pour une zone. Cette répartition a été établie en fonction du relevé de présence pendant une journée type de travail, cette répartition est illustrée la Figure 13.

	OP01	B01	B02
<b>Puissance nominale éclairage [W/m<sup>2</sup>]</b>	9.16	9.45	10.2
<b>Puissance nominale équipement [W/m<sup>2</sup>]</b>	11.5	8.75	4.6
<b>Chaleur sensible des employés [W/pers]</b>	85	85	85
<b>Taux d'occupation [pers]</b>	22	2	1

*Tableau 8 : Paramètres influençant les gains dans chaque local étudié*

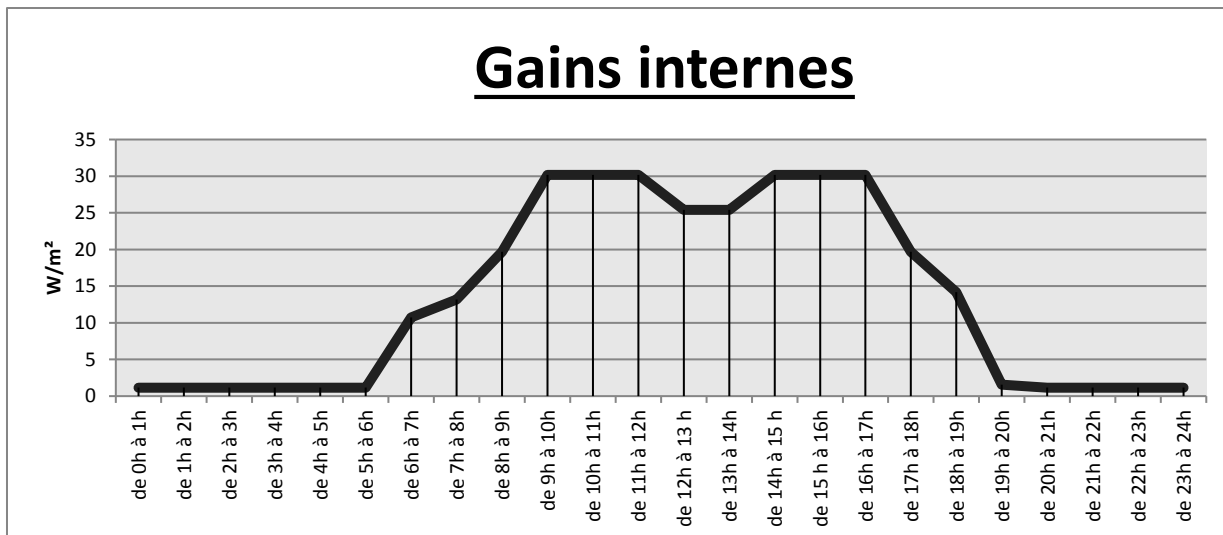


Figure 12 : Gains internes répartis en fonction des paramètres de présence lors d'une journée type



Figure 13 : Nombre d'employés présents lors d'une journée type dans le bâtiment

Dans la simulation de la ventilation, les hypothèses paramétrées dans TRNSYS sont différentes de celle du modèle 1.A. Elles ont été établies après analyse des données de présence des employés, des plans reçus par Besix et de la capacité de chaque bouche de pulsion. Le système de ventilation (système D) sans récupérateur de chaleur se comporte différemment. Nous avons supposé que les débits d'air pulsés étaient équivalents aux débits d'air extraits. Les débits pulsés ont été calculé en fonction du nombre de bouches de pulsion présentes dans chaque pièce et du

débit de chacune de ces bouches. Pour représenter la différence avec le PHPP, prenons comme exemple la zone B01 qui est un bureau de 23 m<sup>2</sup> contenant deux employés. Dans le PHPP le débit sera de  $\frac{23}{20} \cdot 30 \text{ m}^3/\text{h}$  car il est basé sur une étude de surface. Alors que dans le modèle 1.B on aura 65 m<sup>3</sup>/h car il est basé sur le débit fourni dans ce local (B01)

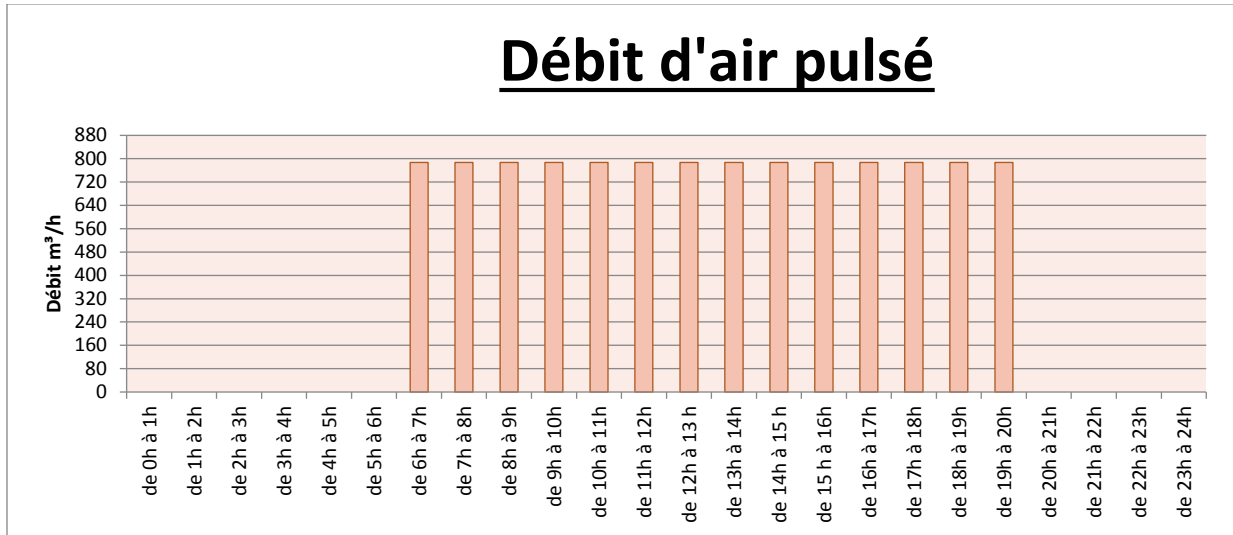


Figure 14 : Débit d'air pulsé dans les locaux selon les données collectées

Les nouvelles hypothèses prises dans le modèle 1.B vont engendrer des résultats différents car en plus d'avoir une méthode de calcul basée sur des algorithmes différents, les hypothèses ne sont plus identiques. Par exemple, il y aura une différence non négligeable dans la consommation énergétique liée à la ventilation. Par rapport au PHPP, il y aura plus d'air pendant plus longtemps à réchauffer ou à refroidir.

### Modèle 1.B : Résultat

Nous réalisons la même comparaison que précédemment au niveau énergétique.

<b>PHPP</b>	
Besoin de chaleur de chauffage	30,76 [kWh/m²a]
Demande totale de refroidissement	18 [kWh/m²a]

<b>TRNSYS</b>			
Zone	Besoin de chaleur [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de refroidissement [kWh/m <sup>2</sup> a]	Surface [m <sup>2</sup> ]
OP01	33,9	34,8	197
B01	34,9	35,1	23
B02	40,5	11,5	21
<b>Total</b>	<b>34,5</b>	<b>32,8</b>	<b>241</b>

Tableau 9 : Résultat énergétique de TRNSYS (modèle 1.B)

### Modèle 1.B : Analyse

Les résultats de cette simulation dynamique nous donnent une vision plus réaliste du comportement des locaux du bâtiment car les hypothèses de chaque local sont plus précises que dans la méthode statique. Elles sont basées sur les plans et relevés fournis. Le modèle 1.B reprend les hypothèses distinctes de chaque local du bâtiment et reflètent donc la réalité du comportement du bâtiment.

Paradoxalement à la simulation précédente, les besoins de chaleurs de la simulation dynamique se rapprochent plus de la simulation statique. Les méthodes de calcul du PHPP influencées par les coefficients empiriques combinés avec ses hypothèses donnent un résultat proche de la simulation dynamique basé sur le comportement réel. Même si la raison de cette augmentation du besoin de chaleur est due à la forte augmentation du débit de pulsion, la similitude des besoins de chaleur est un hasard. Le débit étant plus important dans le modèle 1.B, il demande plus d'énergie afin d'atteindre la température de consigne de pulsion. Cette augmentation de débit nous fait réaliser qu'un travail sur la récupération de chaleur de la ventilation nous permettra une forte économie du besoin de chaleur [14].

Le besoin de refroidissement est quasi similaire à celle obtenu avec la simulation précédente. Cela est assez logique comme résultat. La grande différence entre ces deux modèles est la simulation des gains internes et de la ventilation. Même si les surchauffes sont influencées par l'augmentation des gains internes, elles sont compensées par un plus grand débit de ventilation à température constante.

La comparaison des modèles statiques et dynamiques devient assez difficile dans cette étude. En effet, le fait de ne pas avoir les mêmes hypothèses quant aux techniques de gestion d'énergie combinée à la différence non négligeable des surfaces étudiées a comme résultat une comparaison de deux situations différentes. Nous allons donc nous concentrer sur l'étude

énergétique des surfaces des trois locaux modélisés dans l'étude dynamique afin d'atteindre le confort en température pour les occupants.

### Modèle 1.B : Etudes des températures

Grâce à notre simulation dynamique, nous pouvons analyser très précisément les différentes périodes de surchauffes et les périodes de sous-refroidissements présentes dans nos locaux. Ces deux périodes se produisent lorsque la température opérative du local ne se trouve plus dans une certaine gamme de températures de confort ( $20^{\circ}\text{C}$  à  $25,5^{\circ}\text{C}$ ) selon la norme EN 15251 [23], les paramètres influençant ces périodes sont [14] :

- Températures extérieures
- Gains internes
- Isolation des parois

La température opérative (Figure 15) est définie comme la température de confort ressentie par l'occupant [8]. Elle peut être évaluée comme la moyenne entre la température de l'air dans le local et les températures des parois. Pour influencer la température opérative nous allons devoir modifier notre température de consigne car c'est elle que nous pouvons modifier et qui influence la température opérative ressentie.

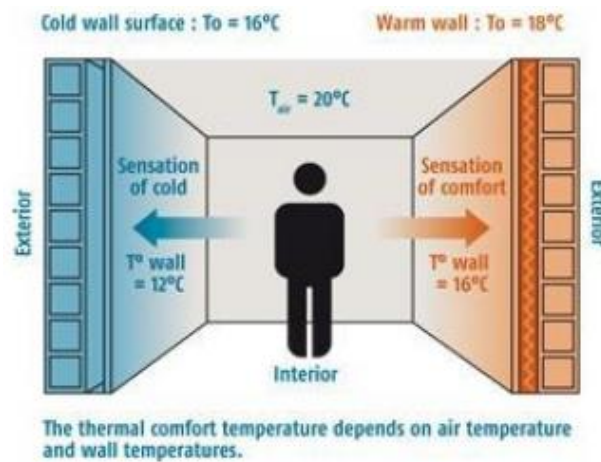


Figure 15 : Température opérative [21]

La vérification du niveau de confort se définit de la façon suivante : le nombre d'heures au-delà/en dessous de  $25,5^{\circ}\text{C}/20^{\circ}\text{C}$  en température opérative ne peut dépasser les 5 % du temps de travail ou temps d'occupation. Nous avons réalisé le calcul suivant afin de trouver ce nombre d'heures.

Nombre d'heures sur une année [h]	Nombre d'heures d'occupation par jour [h]	Nombre d'heures d'occupation sur l'année [h]	Pourcentage autorisé	Nombre d'heures autorisés [h]
8760	12	3120	5 %	<b><u>156</u></b>

Dans notre modèle 1.B, en période de froid, la température à maintenir dans les locaux est de 20°C alors qu'en période chaude le groupe de refroidissement ne s'active que lorsque la température dépasse les 25°C. Ces consignes seront appliquées pour notre première analyse de température opérative.

Dans les figures suivantes, nous représentons les températures opératives dans un local durant plusieurs jours d'un mois spécifique. La Figure 16 nous montre la variation de température opérative dans le local B02 durant le mois de décembre. Nous constatons que les 20°C ne sont jamais atteints durant toute la semaine, cela est dû à la forte influence des parois dans la température opérative ressentie.

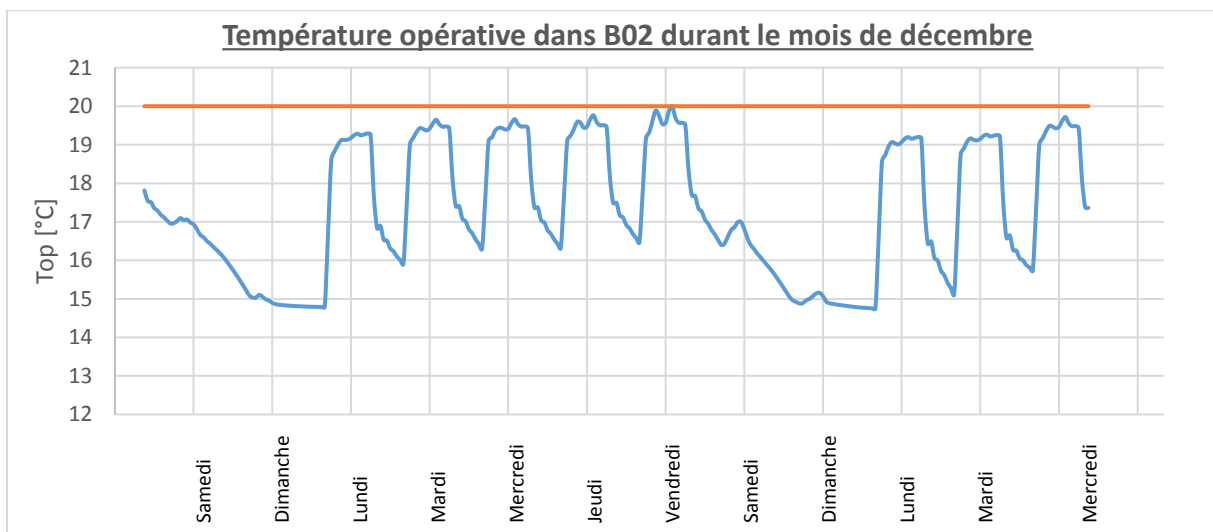


Figure 16 : Température opérative de B02

La Figure 17 nous montre la variation de température opérative dans le local B02 durant le mois de décembre. Nous constatons que les 25,5°C sont dépassés durant une majeure partie de la semaine. Les températures du mois de juillet couplées aux gains internes engendrent ce dépassement.

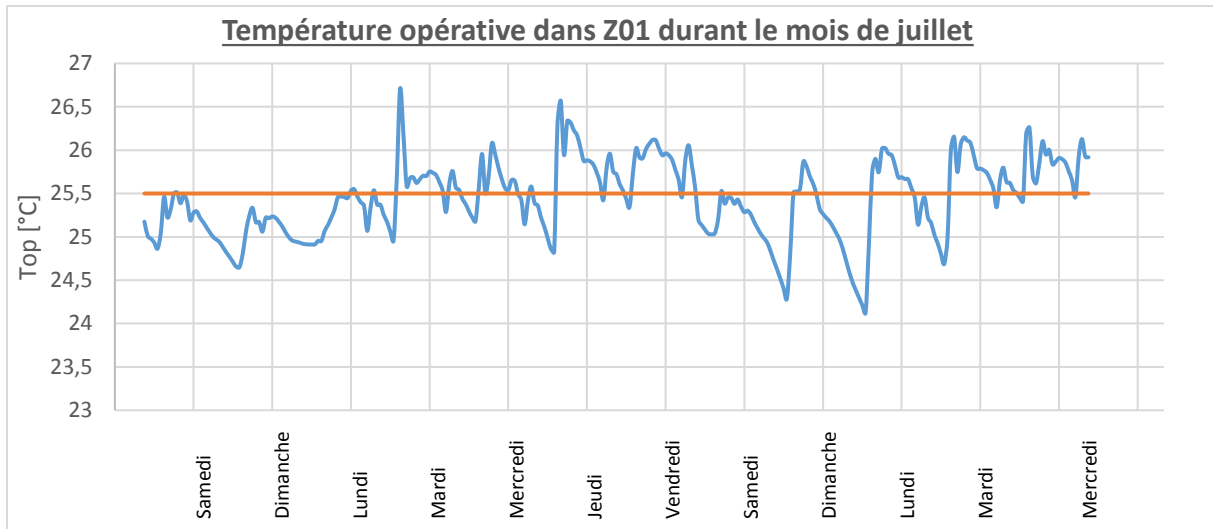


Figure 17 : Température opérative de Z01

Dans le Tableau 10, nous reprenons l'ensemble des locaux avec le nombre d'heures de franchissement des températures sur une année. Nous exprimons ce nombre d'heures en pourcentage par rapport au nombre d'heures d'occupation.

Zone	Nombre d'heures en surchauffe (Top > 25,5°C)	Ratio par rapport aux heures d'occupations	Nombre d'heures en sous-refroidissement (Top < 20°C)	Ratio par rapport aux heures d'occupations
OP01	605	19%	121	4%
B01	160	5%	226	7%
B02	96	3%	874	28%

Tableau 10 : Nombre d'heures de dépassement des températures de confort

Le confort n'est pas atteint dans les 3 locaux, une adaptation des températures de consignes sera nécessaire afin d'arriver aux températures de confort. Pour trouver la température optimale, nous avons réalisé une série d'essais afin d'établir une courbe de tendance. Ensuite, nous avons imposé un nombre d'heures maximales (156 h) pour trouver la température de consigne souhaitée. Un exemple d'optimisation de la température de consigne en été de B01 est représenté à la Figure 18. En vert nous avons représenté la courbe de tendance et la température optimale est représentée en orange.

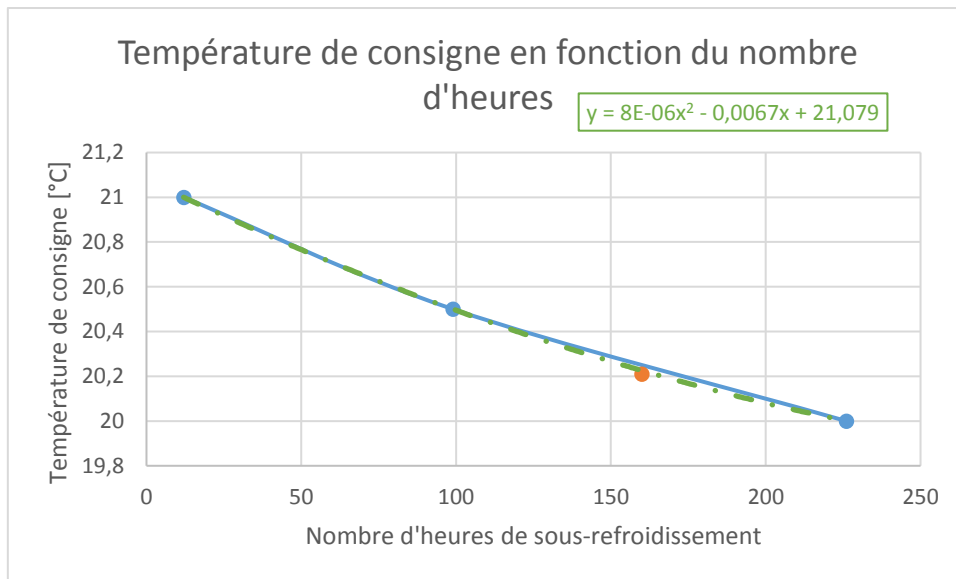


Figure 18 : Exemple d'optimisation de la température de consigne en fonction du nombre d'heures (B01)

Nous avons réalisé cette étude pour chaque température de consigne dans chaque local, dans le Tableau 11, nous résumons les différentes consignes à adopter.

Zone	Température de consigne en période chaude [°C]	Température de consigne en période froide [°C]
OP01	24,5	20
B01	24,9	20,3
B02	25	21

Tableau 11 : Température de consigne trouvée via l'optimisation

De nouveaux calculs ont été réalisés en fixant les températures de consignes aux valeurs définies dans le Tableau 11. Nous pouvons constater une amélioration du confort thermique illustré dans la Figure 19 et Figure 20.

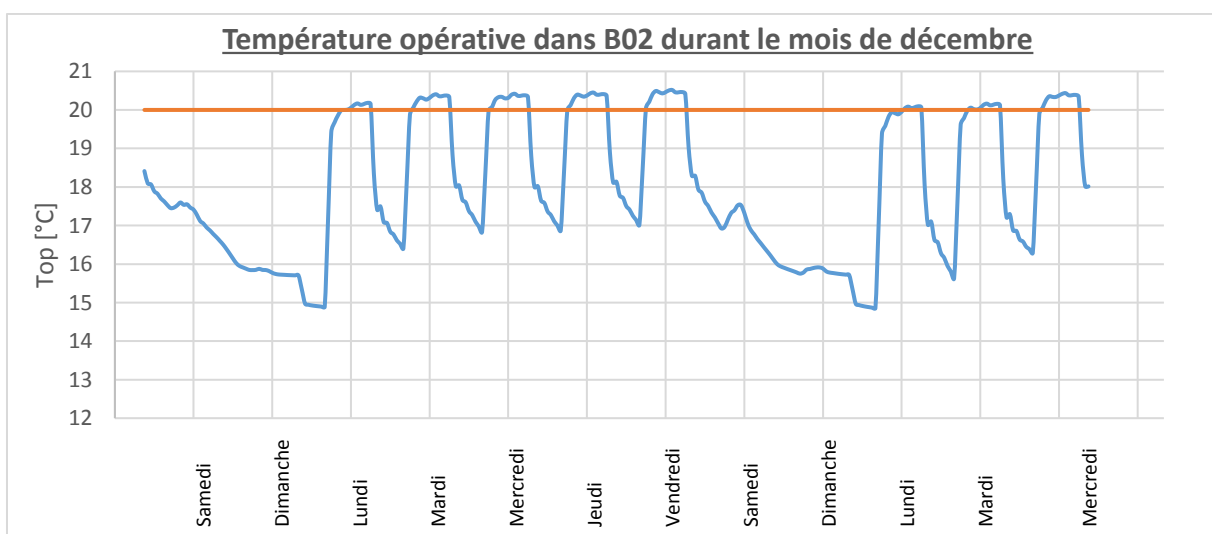


Figure 19 : Température opérative de B02 avec nouvelle consigne

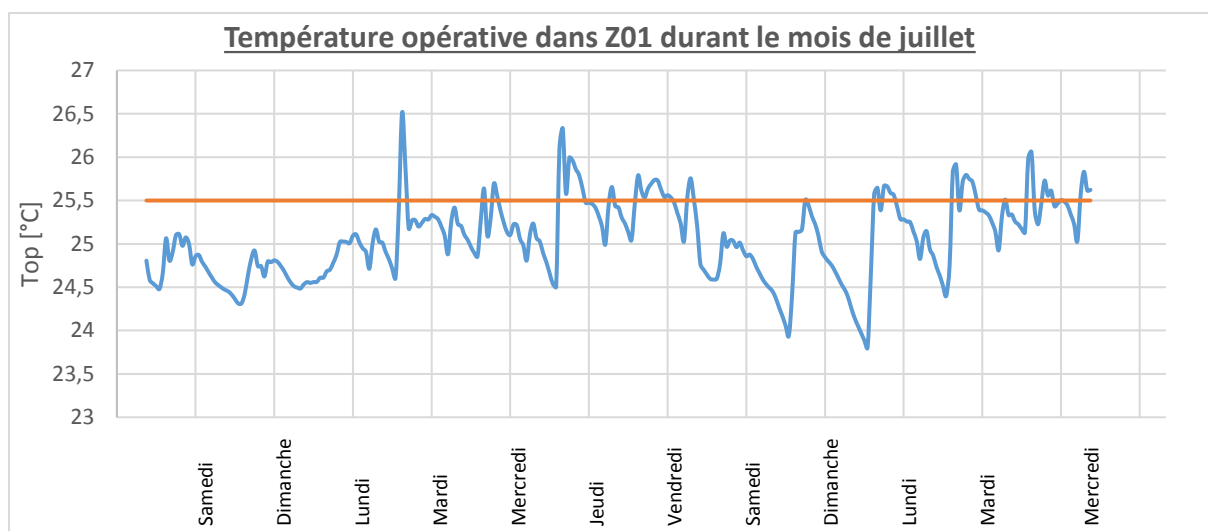


Figure 20 : Température opérative de Z01 avec nouvelle consigne

L'analyse complète du nombre d'heures de surchauffe et de sous-refroidissement avec les nouvelles consignes est détaillée dans le Tableau 12.

Zone	Nombre d'heures en surchauffe (Top > 25,5°C)	Ratio par rapport aux heures d'occupations	Nombre d'heures en sous-refroidissement (Top < 20°C)	Ratio par rapport aux heures d'occupations
OP01	134	4%	124	4%
B01	68	2%	155	4%
B02	113	4%	129	4%

Tableau 12 : Nombre d'heures de dépassement des températures de confort avec consignes optimisées

Ceci représente l'étude des températures optimisées du bâtiment. Dans le cadre des simulations thermiques dynamiques qui suivent, nous allons garder ces valeurs de consignes pour ce modèle afin de respecter les critères de confort. Le Tableau 13 donne les besoins énergétiques selon les températures de consigne choisies pour le modèle 1.B.

Zone	Besoins énergétiques avant ajustement des consignes		Besoins énergétiques après ajustement des consignes	
	Besoin de chaleur (modèle 1.B) [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de refroidissement (modèle 1.B) [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de chaleur (modèle 1.B') [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de refroidissement (modèle 1.B') [kWh/m <sup>2</sup> a]
OP01	33,9	34,8	33,9	39,9
B01	34,9	35,1	35,6	36,7
B02	40,5	11,5	46,8	12,3
<b>Total</b>	<b>34,5</b>	<b>32,8</b>	<b>35,2</b>	<b>37,2</b>

Tableau 13 : Tableau de comparaison des besoins énergétiques avant et après ajustement des consignes

Nous constatons que l'ajustement des températures de consignes (modèle 1.B') afin de satisfaire le confort des occupants engendre une légère augmentation des besoins énergétiques. Ces besoins donnent une représentation plus réelle des besoins du bâtiment car elle tient compte du confort des occupants. Nous pouvons remarquer dans ce tableau toute l'influence de l'open space (OP01) dans le bilan total énergétique. En effet, sa surface représente plus de 80% de la surface totale étudiée.

Maintenant que nous avons étudié le comportement énergétique des différents locaux, nous allons pouvoir nous intéresser à la rénovation de ceux-ci et aux efforts à consentir. Il va falloir faire baisser les besoins de chaleur tout en n'augmentant pas l'énergie à fournir pour refroidir le bâtiment. Au-delà des systèmes à installer, toute l'optimisation énergétique passera par un ajustement intelligent des différents systèmes. Il va falloir utiliser tous les moyens techniques mais aussi comportementaux afin de faire baisser les besoins énergétiques.

## Chapitre 5 – Analyse de la situation rénovée : modèle 2

Après avoir reçu plusieurs devis sur différents types de travaux de rénovation à réaliser, Besix a décidé de remplacer les luminaires, d'installer un nouveau système de ventilation avec récupération de chaleur et de réaliser des travaux d'isolation dans la toiture.

L'ensemble de l'éclairage est composé de lampes fluorescentes. Une étude a été menée par une société afin de quantifier l'économie d'énergie réalisée lors d'un remplacement de ces lampes par des lampes LED. Pour ce faire ils ont pris plusieurs hypothèses. En premier, ils ont considéré que s'il remplaçait toutes les lampes fluorescentes par des lampes LED, leurs durées de vie seraient multipliées par deux. Ensuite ils ont considéré une utilisation de 13h par jour et durant toute l'année, week-end et congés compris. Ces hypothèses sont exagérées mais le but de cette étude était de mettre en évidence l'économie d'énergie réalisée. Cette comparaison est détaillée dans le Tableau 14.

<b>Consommation actuelle</b>						
<b>Produits</b>	<b>Consommation (Watts)</b>	<b>Quantité</b>	<b>Consommation totale (Watts)</b>	<b>Heures d'utilisation</b>	<b>Jours</b>	<b>Total kWh/An</b>
Tube T8 120 cm	36	43	6516	13	365	7345,26
Tube T8 60 cm	18	38	18	13	365	3245,58
					<b>Total</b>	<b>10590,84</b>
<b>Consommation LED</b>						
<b>Produits</b>	<b>Consommation (Watts)</b>	<b>Quantité</b>	<b>Consommation totale (Watts)</b>	<b>Heures d'utilisation</b>	<b>Jours</b>	<b>Total kWh/An</b>
Panel 120x30	40	21	3640	13	365	3985,8
Panel 60x30	27	19	27	13	365	2434,185
					<b>Total</b>	<b>6419,985</b>
<b>Economies réalisées grâce au LED</b>						<b>4170,855</b>
<b>Pourcentage d'économie</b>						<b>39%</b>

Tableau 14 : Etude d'économie d'énergie

Ce changement d'équipement aura une influence directe sur les gains internes du bâtiment. Dans le Tableau 15 nous comparons la différence de gains internes dans chaque local avant et après rénovation.

<b>Puissance nominal éclairage [W/m<sup>2</sup>]</b>			
<b>Zone</b>	<b>Avant rénovation</b>	<b>Après rénovation</b>	<b>Différence</b>
OP01	9,16	5,62	<b>39%</b>
B01	9,45	5,86	<b>38%</b>
B02	10,2	6,33	<b>38%</b>

*Tableau 15 : Comparaison des puissances nominales avant et après rénovation*

On réalise une économie de l'ordre de 40% dans chaque local ce qui représente une grande différence. Cependant, cette économie aura une influence moindre dans les gains internes car celle-ci sera englobée avec la puissance dégagée par les équipements et la chaleur corporels des employés.

Pour le moment dans le bâtiment, l'air est chauffé dans le groupe de ventilation afin d'être amené à 20 degrés dans chaque local. Ensuite l'air est évacué dans les garages avant de partir vers l'extérieur. Dans l'optique d'occuper un bâtiment passif, ce cas de figure n'est plus envisageable. Il faut récupérer la chaleur de l'air évacué des locaux. L'énergie perdue est considérable, c'est pourquoi Besix a décidé d'installer un récupérateur de chaleur dans le but de réduire les déperditions par renouvellement d'air.

Nous allons réaliser et comparer deux modèles avec une seule différence : la gestion de la ventilation. Dans le premier (modèle 2.A) nous allons utiliser de manière classique la ventilation avec son récupérateur de chaleur afin de réaliser des économies de chauffages sur l'ensemble des locaux. Dans le deuxième (modèle 2.B), nous allons aussi utiliser cette ventilation afin de refroidir le bâtiment lorsque les conditions s'y prêtent (free cooling) [22]. Cette méthode sera détaillée dans la partie correspondant au modèle.

### **Modèle 2.A : Ventilation sans free cooling**

Ce modèle prend en considération toute la rénovation mais utilise seulement la ventilation pour satisfaire le confort hygiénique et non thermique. Pour cela il utilise son récupérateur de chaleur selon certains critères. Le récupérateur de chaleur fonctionne constamment sauf lorsque deux critères sont atteints. Le premier est de mesurer s'il fait plus chaud à l'extérieur qu'à l'intérieur du bâtiment et si cette température extérieure est plus grande que la température minimale de pulsion. Si ces deux situations se produisent, le récupérateur de chaleur s'arrête et laisse donc de l'air plus frais arriver directement dans les locaux. Cette situation se produit généralement en été.

## Modèle 2.A : Résultat

Nous allons maintenant évaluer les besoins énergétiques réalisés avec les simulations dynamiques entre le bâtiment initial et le bâtiment rénové (Tableau 16). Le but étant de respecter le confort thermique des occupants, nous comparerons ces modèles avec les consignes optimisées de températures.

Zone	Besoin de chaleur (modèle 1.B') [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de refroidissement (modèle 1.B') [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de chaleur (modèle 2.A) [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de refroidissement (modèle 2.A) [kWh/m <sup>2</sup> a]
OP01	33,9	39,9	1	40,8
B01	35,6	36,7	3,4	35
B02	46,8	12,3	13,5	18,2
<b>Total</b>	<b>35,2</b>	<b>37,2</b>	<b>2,3</b>	<b>38,5</b>

Tableau 16 : Comparaison des énergies avant et après rénovation

## Modèle 2.A : Analyse

Nous constatons une très grande différence au niveau des besoins de chaleur de chauffage sur l'ensemble des locaux. Cette diminution est le résultat de la mise en place du récupérateur de chaleur. En effet, le bâtiment a une isolation correcte combinée avec des gains internes assez conséquents. Il n'a donc pas besoin de chauffage si ce n'est pour chauffer l'air amené de l'extérieur. Avec le système de récupération, cet air ne doit quasiment pas être chauffé. On peut conclure que le récupérateur de chaleur est un réel plus dans l'économie de besoin de chaleur de chauffage.

Après les travaux de rénovation, la demande totale de refroidissement a pour sa part légèrement augmenté, cela est aussi une conséquence de la modification du système de ventilation. Avant on pulsait constamment de l'air à 20°C, maintenant cette température est variable à cause du récupérateur de chaleur et elle est souvent supérieure à 20°C en été. Cet air est un apport de chaleur en plus dans les locaux et il doit être compensé par une production de froid. Cela a pour conséquence l'augmentation des besoins de refroidissements.

## Modèle 2.B : Ventilation avec free cooling mécanique

Dans le modèle 2.B, nous avons utilisé le système de ventilation afin de refroidir le bâtiment quand cela est nécessaire, il se base sur le principe de free cooling mécanique. Ce système est simple, lorsque la température des locaux dépasse une certaine température (22°C dans notre simulation) et que la température extérieure est inférieure à cette même température alors la ventilation se met en marche et pulse de l'air venant directement de l'extérieur. Par exemple, à

la fin d'une journée de travail d'été, s'il fait plus de 24°C dans un local, la ventilation va s'enclencher afin de diminuer la température jusqu'à 22°C si la température extérieure le permet. Pour cela la ventilation va utiliser son débit de pulsion maximum. L'économie est non négligeable car nous utilisons la fraîcheur gratuite de l'extérieur afin de diminuer la température. Même si la consommation électrique de la ventilation augmente car la ventilation fonctionne plus souvent, le gain est réel [22].

### Modèle 2.B : Résultat

Nous allons comparer dans le Tableau 17 les besoins énergétiques du modèle sans free cooling et avec (modèle 2.A et 2.B) afin de quantifier les économies d'énergie. Nous réalisons toujours cette comparaison avec les températures optimisées pour tenir compte du confort des occupants. Nous allons aussi dans ce tableau introduire la consommation de la ventilation des locaux afin d'analyser l'influence de l'augmentation du temps de pulsion.

Zone	Modèle 2.A		Modèle 2.B	
	Besoin de chaleur [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de refroidissement [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de chaleur [kWh/m <sup>2</sup> ]	Besoin de refroidissement [kWh/m <sup>2</sup> a]
OP01	1	40,8	2,3	20,5
B01	3,4	35	4,4	19
B02	13,5	18,2	19,8	7
<b>Total</b>	<b>2,3</b>	<b>38,5</b>	<b>4,1</b>	<b>19,2</b>

Tableau 17 : Comparaison des énergies des modèles rénovés avec et sans free cooling

Consommation ventilation modèle 2.A [kWh/m <sup>2</sup> a]	Consommation ventilation modèle 2.B [kWh/m <sup>2</sup> a]
4,9	10,7

Tableau 18 : Consommation de la ventilation avec et sans free cooling

### Modèle 2.B : Analyse

En comparant ces tableaux, nous pouvons réaliser plusieurs constatations. En premier, il y a une augmentation du besoin de chaleur car le refroidissement gratuit permet de réduire la température jusque 22°C et donc en hiver la température chutera plus rapidement. Cela est dû à un free-cooling quotidien et non optimisé. Même si la valeur de besoin de chaleur pourrait rester stable par rapport au modèle 2.A, elle reste assez faible et correspond aux standards passifs.

Le réel gain dans cette optimisation est la diminution de moitié de la demande en refroidissement. Le free cooling apporte véritablement une solution afin de diminuer le besoin de refroidissement dans les bâtiments passifs. Un bâtiment passif n'est pas envisageable sans une gestion intelligente de la ventilation incluant un free cooling.

Cependant, il ne faut pas négliger la consommation électrique de cette ventilation, elle est aussi doublée. Or dans un bâtiment passif, la consommation d'énergie primaire est réglementée [23]. Même si cette électricité peut être compensée par des moyens durables (panneaux solaires, éoliennes,...), elle doit aussi faire l'objet d'une attention et une optimisation. En effet dans l'optique de réaliser des bâtiments plus propres, nous devons viser la diminution du besoin énergétique et non la compensation.

Nous pouvons conclure que le modèle 2.B est le modèle représentant au mieux les travaux qui vont être réalisés car ils reprennent à la fois les modifications apportées et une bonne gestion technique des systèmes mis en place. Avec les modifications apportées à la ventilation et aux gains internes, nous constatons une grande évolution dans les besoins de chaleurs à cause de la mise en place d'un récupérateur de chaleur. Afin de diminuer les besoins de refroidissement, une optimisation de la gestion de la ventilation est à établir grâce aux free cooling mécaniques. Avec cette nouvelle gestion, le besoin de refroidissement est diminué même si nous constatons une augmentation logique de la consommation électrique de cette ventilation. Aucune autre modification n'est prévue dans la rénovation. Dans la suite nous allons modifier le PHPP afin d'avoir à titre indicatif une idée des besoins totaux du bâtiment. Cette analyse n'a rien d'une certification mais elle positionnera les travaux par rapport aux attentes de Besix.

### Situation par rapport au critère passif du modèle 2.B

Nous avons introduit toutes les modifications apportées au bâtiment dans le PHPP, le but de cette démarche est d'avoir à titre indicatif des valeurs sur les besoins de chaleurs et les besoins de refroidissement de l'ensemble du bâtiment. Comme la certification passive se fait sur base du PHPP, nous pourrions avoir une idée des valeurs références afin d'analyser notre modèle. Dans le Tableau 19, nous comparons les besoins avant et après rénovation. Ces besoins sont calculés via le PHPP, nous retrouvons les valeurs de notre modèle 1.A calculée avec celui-ci et nous calculons les besoins du bâtiment avec les rénovations. Dans ce modèle 2.B, la toiture est mieux isolée, il y a une ventilation double flux avec récupérateur de chaleur et on utilise la ventilation pour réaliser un free cooling mécanique.

Zone	Besoin de chaleur (modèle 2.A) [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de refroidissement (modèle 2.A) [kWh/m <sup>2</sup> a]
Modèle 1.A	30,76	18
Modèle 2.B	31,5	8

Tableau 19 : Résultat énergétique du PHPP

La première constatation est l'augmentation du besoin de chaleur entre les deux modèles alors que nous avons installé une ventilation plus performante et isolé la toiture. Tout d'abord l'isolation de la toiture n'améliore pas beaucoup le besoin de chaleur. La proportion de toiture par rapport aux autres parois est minime dans un bâtiment de 25 m de haut et cette toiture ne diminue que légèrement le besoin de chaleur. La raison de l'augmentation du besoin de chaleur est dans la quantité le débit d'air chauffé dans le bâtiment. Tout est dans l'imposition du taux de renouvellement de l'air, ce taux est le rapport entre le débit d'air ( $m^3/h$ ) et le volume d'air ventilé. Les normes imposent un taux de renouvellement standard de 0,4 [1/h] et un minimum de 0,3 [1/h] [23]. Dans le système de ventilation avant la rénovation, ce taux est de 0,077 [1/h] ce qui est minime par rapport au 0,36 [1/h] fourni après la rénovation. A titre indicatif, si nous forçons un taux de 0,077 [1/h] avec la nouvelle ventilation, nous avons un besoin de chaleur de [29 kWh/m<sup>2</sup>a]. Le besoin de refroidissement a diminué après la rénovation, c'est le résultat de la mise en place d'un free-cooling.

La version du PHPP que nous avons ne nous permet pas de calculer l'énergie primaire consommée via la ventilation et les auxiliaires. Nous utilisons notre modèle dynamique et les données à dispositions afin de les estimer. Pour calculer l'énergie primaire, nous réalisons la somme des différents besoins et des consommations des lumières, de la ventilation et des équipements auxiliaires multipliés par un coefficient de performance qui prend en compte les transformations nécessaires avant la livraison de l'énergie pour son utilisation (COP). En effet, 1kWh de gaz naturel équivaut à 1kWh d'énergie primaire mais 1kWh d'électricité équivaut à 2,5 kWh d'énergie primaire. Nous incluons aussi les rendements des machines dans nos calculs. Les autres critères du standard passif sont considérés comme acquis étant donné que les valeurs suivantes ont été calculées en respectant les durées de surchauffes et de sous-refroidissements avec une étanchéité à l'air de  $0,6 h^{-1}$ . Dans le Tableau 20, nous convertissons les besoins totaux afin de connaître l'énergie primaire totale. Ensuite dans le Tableau 21 nous allons comparer les valeurs de notre modèle avec les valeurs du standard passif. Ce calcul nous permet de nous situer par rapport au standard passif, il n'est pas le résultat d'une certification.

	Besoin de chaleur de chauffage [kWh/m <sup>2</sup> a]	Demande totale de refroidissement [kWh/m <sup>2</sup> a]	Lumières et auxiliaires [kWh/m <sup>2</sup> a]	Energie primaire [kWh/m <sup>2</sup> a]
Valeurs totales	31,5	8	16,64	
<i>Rendement</i>	90 %	250 %	/	
<i>COP</i>	1 %	250 %	250 %	
Valeurs totales corrigées	35	8	41.6	<b>84,6</b>

Tableau 20 : Transformation des énergies en fonction de leurs COP

	Modèle 2.B	Critère passif	Respect
Besoins de chaleur [kWh/m <sup>2</sup> a]	35	15	Non
Besoin de refroidissement [kWh/m <sup>2</sup> a]	8	15	Oui
Energie primaire [kWh/m <sup>2</sup> a]	84,6	79	Non

Tableau 21 : Evaluation du critère passif du modèle après rénovation

Même si nos calculs ne représentent pas le comportement énergétique certifié du bâtiment, il nous donne une bonne approximation des besoins de celui-ci. Nous voyons que deux critères ne sont pas respectés. Nous pouvons nous y attendre car les travaux réalisés ne suffisent pas à atteindre ce critère. Un bâtiment passif doit réellement être pensé comme un bâtiment intelligent qui doit consommer le moins d'énergie. Nous allons maintenant analyser les causes de cet échec et proposer quelques solutions afin d'atteindre notre objectif.

Tout d'abord analysons les deux problèmes de nos locaux, nous avons clairement un non-respect du critère du besoin de chauffage. L'isolation des parois peut être une piste à envisager. Même si l'évaluation du besoin de refroidissement est en dessous des 15 kWh/m<sup>2</sup>a, cette valeur, évaluée via le PHPP, peut-être sous-évaluée. Des propositions comme du free-cooling par ouverture de fenêtres ou des protections solaires seront étudiées afin de diminuer ce besoin. Ensuite, la proportion d'énergie primaire est trop importante. Afin de diminuer cette proportion deux choix s'offrent à nous, soit la production d'énergie de façon durable ou la diminution de cette énergie. Nous allons nous attarder à la diminution de cette énergie. Ces solutions techniques seront évaluées dans le prochain chapitre. D'autres solutions pourraient être étudiées comme le comportement des employés (diminuer leur nombre par mètres carrés), diminution des gains internes,... La plupart des solutions proposées dans le prochain chapitre ne seront pas réellement exécutées car elles ne sont pas prévues dans la rénovation. Ces études sont réalisées afin de proposer des solutions dans le but de diminuer les besoins du bâtiment, elles s'attardent sur la ventilation, la production d'énergie et les protections solaires.



## Chapitre 6 – Développements des solutions

Nous allons développer plusieurs idées qui pourraient permettre de diminuer la consommation d'énergie du bâtiment. Ces solutions sont des pistes qui sont connues et qui ont déjà prouvé leur efficacité.

### Proposition 1

Tout d'abord attardons-nous à la diminution de la demande en refroidissement, pour cela nous allons partir de notre idée de free cooling mais en la modifiant légèrement. Nous n'allons plus utiliser la ventilation afin de refroidir notre bâtiment mais simplement par un système d'ouverture des différentes fenêtres [9]. Cette technique permettra à la fois de fournir un débit plus important pour refroidir les locaux et diminuera la consommation de la ventilation qui avait été doublé lors de l'élaboration du modèle 2.B. Afin de simuler cette ouverture des fenêtres nous allons modifier notre modèle 2.B en augmentant le débit de pulsion lors de la ventilation free-cooling, nous appellerons le modèle 3.

Nous réalisons différents calculs afin de savoir quel débit pourra être mis en place dans chaque local. Nous nous basons sur un système avec deux ouvertures battantes identiques comme illustrées sur la Figure 21.

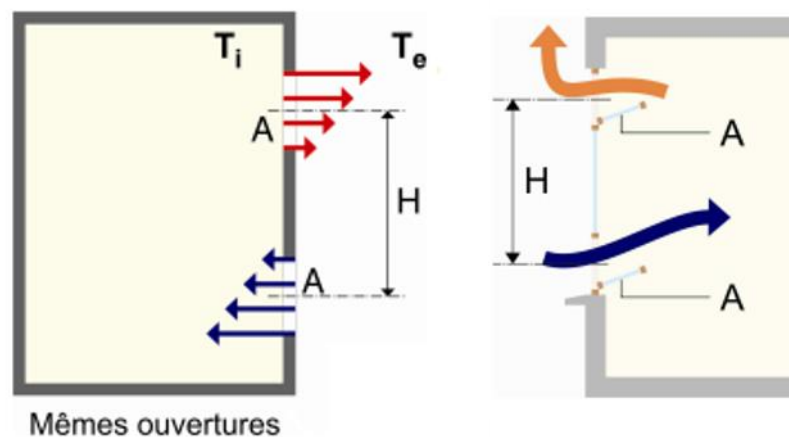


Figure 21: Système d'ouverture de fenêtres [6]

Nous prenons comme hypothèse :

- Ouverture de même surface :  $A = 0,225 \text{ m}^2$  (90 cm x 25 cm) (voir plan annexe 8.2)
- $Cd = 0,6$  coefficient de perte de charge tenant compte des caractéristiques des ouvertures [9]
- $T_e$  inférieur à  $293^\circ\text{K}$
- $T_i$  supérieur à  $293^\circ\text{K}$
- $H = 1,82 \text{ m}$  (voir plan annexe 8.2)

Le débit d'air peut se calculer via :

$$Qv = Cd \cdot A \cdot \sqrt{g \cdot H \cdot \frac{\Delta T}{T_e}} \quad [6]$$

Dans le Tableau 22, nous avons calculé le débit pour une fenêtre en faisant varier le delta de température.

$\Delta T$	$Qv \text{ [m}^3/\text{s]}$	$Qv \text{ [m}^3/\text{h]}$
1	0,0335	120
2	0,0474	170
3	0,058	208
4	0,067	241
5	0,075	269
6	0,0821	295
7	0,0886	319
8	0,0947	341

Tableau 22 : Débits d'air en fonction de la différence de température

L'ensemble des locaux ont des murs-rideaux comme parois extérieures. Si nous prenons l'hypothèse d'un delta de température de  $4^\circ\text{C}$ , chaque fenêtre pourra fournir un débit de  $241\text{m}^3/\text{h}$ . Nous avons décidé de simuler dans notre modèle 3 un débit trois fois supérieur par rapport au débit de free-cooling du modèle 2.B. Cela correspond respectivement à  $1980 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $180 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $360 \text{ m}^3/\text{h}$  pour les locaux OP01, B01 et B02. A titre d'exemple, OP01 possède 30 fenêtres avec ce type de dimension.

Le Tableau 23 nous donne l'économie réalisée grâce au free cooling avec ouverture. Le réel gain se trouve dans la consommation électrique de la ventilation car on revient au  $4,9 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  du modèle 2.A (Tableau 18). Nous n'utilisons que la ventilation pour le confort hygiénique.

Zone	Besoin de chaleur (modèle 2.B) [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de refroidissement (modèle 2.B) [kWh/m <sup>2</sup> a]
OP01	2,3	20,5
B01	4,4	19
B02	19,8	7
<b>Total</b>	<b>4,1</b>	<b>19,2</b>

Besoin de chaleur (modèle 3) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Besoin de refroidissement (modèle 3) [kWh/m <sup>2</sup> a]
8,7	17,5
7,3	13,7
37,3	6
<b>11,1</b>	<b>16,1</b>

Tableau 23 : Optimisation du modèle par ouverture

En simulant une ouverture de fenêtres triplant le débit de pulsion normalement prévu nous constatons une diminution de la demande totale de refroidissement ce qui indique que cette solution poussée à l'extrême permettra presque d'atteindre les 15 kWh/m<sup>2</sup>a. Cependant, cette ventilation intensive engendre un problème, l'augmentation du besoin de chaleur. En effet, dans le modèle 2.B quand on avait un débit moindre, le local prenait plus de temps à se refroidir et il atteignait 22°C beaucoup plus tard dans la soirée ce qui diminuait sa période de repos. Imaginons une journée en été lorsque les employés quittent le bureau à 19h avec une température de 24,5°C dans le local. Dans le modèle B la ventilation tournait jusqu'à 23h afin de diminuer la température à 22°C mais dans le modèle 3, les 22°C sont atteints beaucoup plus tôt.

Nous illustrons notre constatation avec la Figure 22. Nous pouvons remarquer que chaque matin à 6h30 quand les employés arrivent la courbe bleue (température avec ouverture des fenêtres) est en dessous de la courbe orange (température avec ventilation mécanique). La température opérative arrive même parfois en dessous des 20°C ce qui enclenche automatiquement le chauffage. C'est ce comportement qui induit la légère augmentation du besoin de chaleur dans le bâtiment. Avec ce système les locaux sont plus frais le matin et prennent plus de temps à atteindre la température limite qui déclenchera le refroidissement, nous avons là un réel gain d'énergie. La variation de la courbe bleue se produisant entre 19h et 6h30 est due au fort débit induit dans la pièce, cela refroidit directement la température ambiante mais les parois restent à une plus haute température ce qui réchauffe la pièce quand la ventilation s'arrête. On peut appeler cela un effet yoyo. Cela ne se produit pas quand on a une ventilation avec un débit plus petit car la température décroît beaucoup plus doucement.

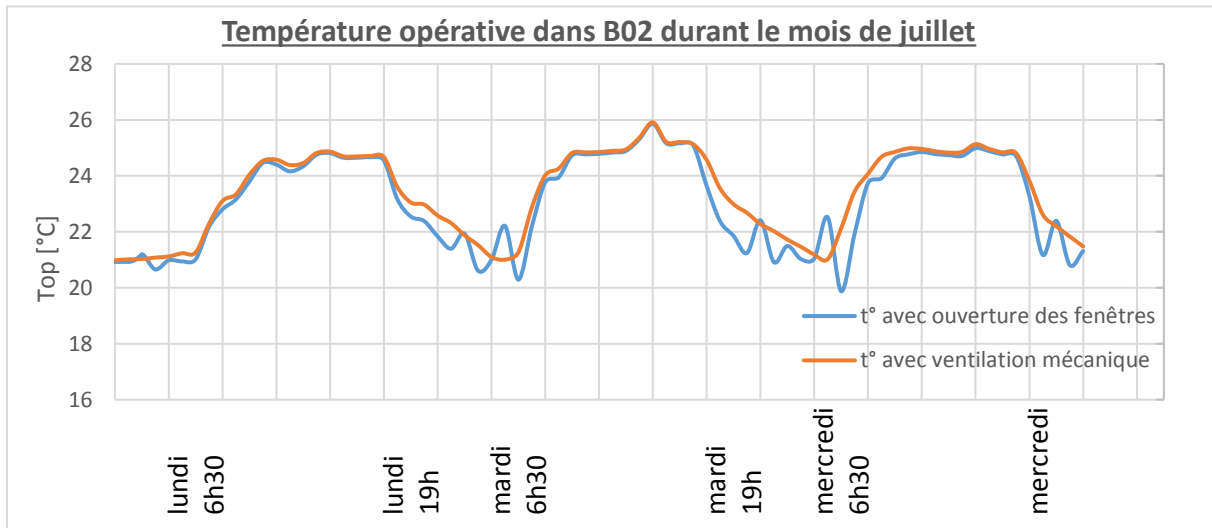


Figure 22 : Comparaison des températures entre la ventilation mécanique et la ventilation par ouverture des fenêtres

Même si une optimisation de notre débit est possible, le débit choisi dans notre simulation 2.B nous donne déjà une grande économie. Nous pouvons conclure que le free cooling avec ouverture des fenêtres est une bonne optimisation pour diminuer rapidement et gratuitement la température des locaux. Il doit cependant être utilisé avec modération afin de ne pas augmenter les besoins de chaleurs. C'est pourquoi dans le cadre de notre simulation, nous tiendrons compte des valeurs des besoins de chauffage et de refroidissement obtenues avec le free-cooling par ouverture de fenêtre mais avec le débit maximum de ventilation. Cela nous permettra d'avoir comme besoins énergétiques ceux du modèles 2.B et une consommation électrique de la ventilation du modèle 2.A.

### Proposition 2

Une autre manière de diminuer l'énergie primaire serait d'optimiser la gestion de l'éclairage électrique en fonction des apports de lumière. En plus de diminuer la consommation électrique, cela diminuera l'apport des gains internes et donc le besoin de refroidissement. Ce sujet sera traité dans un autre travail de fin d'études développé par Martin Godts. Nous n'allons donc pas étudier ce cas.

### Proposition 3

Une façon courante de diminuer la quantité d'énergie primaire d'un bâtiment est l'installation de panneaux photovoltaïques. Comme le bilan de l'énergie primaire est fait entre ce qui est produit et ce qui est consommé [23], nous pouvons faire diminuer de façon drastique notre consommation. Nous allons étudier le fait de compenser notre consommation des lumières et auxiliaires par l'installation de panneaux photovoltaïques.

Si nous réalisons un dimensionnement classique, nous pouvons estimer la surface nécessaire à installer. Supposons que nos 16,64 kWh/m<sup>2</sup>a (Tableau 20) de consommations des lumières et auxiliaires évaluée sur base du modèle dynamique soient représentatives de l'ensemble du bâtiment et non pas seulement des locaux étudiés. Nous voulons compenser cette énergie afin que l'énergie primaire soit en dessous de 79 kWh/m<sup>2</sup>. Cette valeur est le résultat de 90 kWh/m<sup>2</sup>a diminué de 2,5 fois la compacité du bâtiment pour atteindre notre critère (Voir Chapitre 1). La surface totale du bâtiment est de 6370 m<sup>2</sup> ce qui nous fait une énergie ( $E_p$ ) de 105 996,8 kWh (16,64 · 6370) à produire annuellement. Listons les hypothèses de notre calcul [14] :

- Orientation des panneaux : Sud
- Inclinaison des panneaux : 35° (toiture plate)
- En Belgique, 1 kWc, non ombré, exposé plein sud et incliné à 35° produit en moyenne 850 kWh/a
- $\alpha = 1$  suivant la Figure 23 (EF4, facilitateur photovoltaïque)
- Choix du type de panneaux photovoltaïques : BlueSolar Monocrystalline 280W (Figure 24)

		Inclinaison [°]						
		0	15	25	35	50	70	90
Orientation	Est	88%	87%	85%	83%	77%	65%	50%
	Sud-est	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	Sud	88%	96%	99%	100%	98%	87%	68%
	Sud-ouest	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	Ouest	88%	87%	85%	82%	76%	65%	50%

Figure 23 : Coefficient de performance en fonction de l'orientation et de l'inclinaison [10]



BlueSolar Monocrystalline 280W

Dimension	Puissance nominale [W]	Surface $S_u$ pour produire 1 kW [m <sup>2</sup> ]
1005x540x35mm	80	6,8

Figure 24 : Caractéristiques panneaux

Nous pouvons donc trouver le nombre de mètres carrés (S) nécessaire pour produire l'énergie souhaitée :

$$E_p = 850 \cdot \alpha \cdot \frac{S}{S_u}$$

$$105996,8 = 850 \cdot 1 \cdot \frac{S}{6,8}$$

$$S = 847,97 \text{ m}^2$$

La surface nécessaire à la compensation de consommation des luminaires et auxiliaires est non réalisable. Sachant que sur une toiture plate, un panneau de 1 m<sup>2</sup> orienté comme dans nos hypothèses a besoin de 3 m<sup>2</sup> de surface au sol afin de ne pas créer de l'ombre sur les autres panneaux [24]. Il faudrait presque 2500 m<sup>2</sup> de toiture plate alors que dans les données du PHPP, il y a 1705 m<sup>2</sup> de toiture/plancher en contact avec l'extérieur. Cette méthode peut être utilisée pour compenser une partie de la consommation. Dans les bâtiments passifs, les toits sont généralement recouverts de panneaux. Cette solution est une solution facile car elle permet d'éviter un effort de diminution par de la production. Elle ne doit pas éclipser les autres méthodes qui permettent d'économiser de l'énergie.

#### Proposition 4

Afin de diminuer les gains solaires, l'installation de protections solaires est une méthode efficace. Nous avons décidé d'utiliser des brises soleils horizontaux dans notre modèle. Ces protections sont généralement utilisées sur les façades Sud d'un bâtiment car leurs couts sont assez conséquents pour un résultat variable en fonction de l'orientation [14]. Comme nous sommes dans un exercice théorique, nous avons décidé d'installer ces stores sur les façades étant le plus exposé au soleil : les façades Nord-est et Sud-Est. Nous sommes bien conscients que ce n'est pas la disposition optimale mais tenant compte des bâtiments voisins faisant déjà de l'ombre (Figure 4), ces façades sont les plus exposées. Sur la Figure 25, nous représentons les caractéristiques de nos protections solaires.

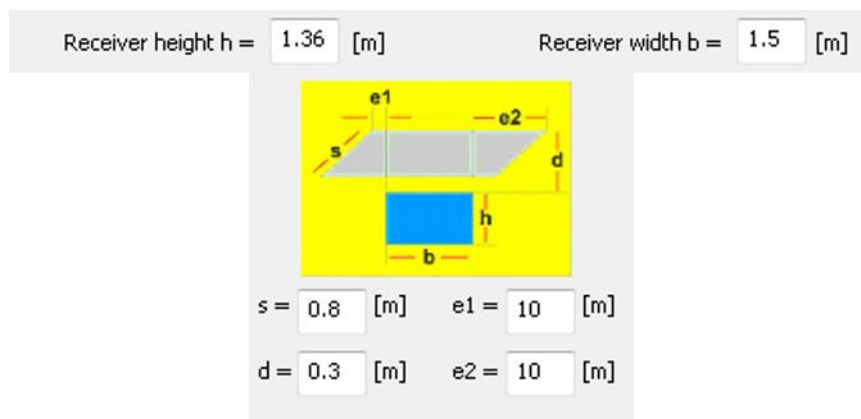


Figure 25 : Caractéristiques protections solaires

Dans le Tableau 24, nous représentons les besoins entre notre modèle 2.B et notre modèle avec les protections (modèle 4).

Zone	Besoin de chaleur (modèle 2.B) [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de refroidissement (modèle 2.B) [kWh/m <sup>2</sup> a]	Besoin de chaleur (modèle 4) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Besoin de refroidissement (modèle 4) [kWh/m <sup>2</sup> a]
OP01	2,3	20,5	2,9	9,1
B01	4,4	19	7,7	2,5
B02	19,8	7	18,9	7,4
<b>Total</b>	<b>4,1</b>	<b>19,2</b>	<b>4,8</b>	<b>8,3</b>

Tableau 24 : Résultats énergétique avec les protections solaires

Les protections solaires apportent un réel plus dans la diminution des besoins de refroidissements, une légère augmentation du besoin de chaleur est aussi constatée. Nous pouvons conclure deux faits grâce à ces résultats. Les gains solaires dans notre bâtiment représentaient beaucoup d'apports internes car on voit qu'avec un système de protections solaire on diminue considérablement nos besoins de refroidissement. Deuxièmement, les protections solaires sont indispensables dans l'élaboration d'un bâtiment passif. Les locaux atteignent de très bonnes performances avec les protections solaires combinées avec le free cooling, ce ne sera peut-être pas dans les autres locaux non étudiés dans la simulation dynamique.

#### Mise en commun des propositions

Nous pouvons constater qu'il n'y a pas une proposition qui pourrait à elle seule rendre le bâtiment passif. Chacune des propositions exposées à ses qualités et c'est en combinant une ou plusieurs de ces solutions que nous pourrions atteindre notre but.

En effet, le free cooling par ouverture permet un refroidissement gratuit des locaux et diminue donc le refroidissement et la consommation de la ventilation mais nous ne pouvons peut-être pas assurer une ouverture maximale des fenêtres, il faut aussi tenir compte de la sécurité du bâtiment en cas d'ouverture de fenêtre au rez-de-chaussée. De plus, l'excès de free cooling engendre une légère augmentation du besoin de chaleur ce qui est contre-productif. L'installation de protections solaires sur les parois les plus ensoleillées permettent de diminuer les gains solaires durant toute l'année. Comme l'ensemble des gains internes combinés avec une bonne isolation suffise à respecter le critère des 15 kWh/m<sup>2</sup>a de besoin de chaleur, l'utilisation de l'ensemble des gains solaires n'est pas nécessaire.

La solution d'utiliser le bâtiment pour produire de l'énergie combiné avec le free cooling et l'installation de protections solaires serait un bon compromis même si la production devrait être utilisée en dernier recours. Ne compensons pas nos excès de consommation avec de la production mais essayons plutôt de réduire le plus intelligemment possible cette consommation.

## Autres types de solutions

Dans les propositions précédentes, nous étudions surtout les aspects techniques du bâtiment comme la ventilation, les protections solaires et la production d'électricité. Cependant, d'autres solutions peuvent être étudiées. Nous ne nous sommes pas concentrés sur les gains internes car avec le remplacement des lampes en LED, ces gains étaient déjà diminués. Le comportement des employés peut aussi être modifié. Si on diminue ce nombre d'employés par mètres carrés, on diminue le nombre d'ordinateurs et par conséquent les gains internes. La température de consigne et le taux de renouvellement de l'air pourraient aussi être modifiés. Dans l'ensemble de nos modèles, nous avons tenu compte des normes et du confort des employés. La gestion de ces paramètres revient à l'entreprise et si les employés acceptent l'une ou l'autre contrainte pour diminuer la consommation du bâtiment, cette solution est envisageable.

## Chapitre 7 – Conclusion

Aujourd'hui et dans le futur, le secteur de la construction va changer. Son influence dans la consommation des ressources énergétiques de notre planète est telle qu'il doit s'adapter et même montrer l'exemple par rapport à d'autres secteurs comme l'automobile ou l'industrie. Pour la fin de l'année 2020, l'Europe a fixé comme ligne de conduite que toutes nouvelles constructions devaient atteindre le NZEB. Cet objectif est aussi d'application pour les rénovations.

La certification de ces nouveaux projets est basée sur l'élaboration du PHPP. Cependant, cet outil présente des défauts qui empêchent de correctement simuler le comportement thermique de l'ensemble des locaux du bâtiment. En effet, le PHPP donne une analyse globale ne tenant pas compte du comportement parfois totalement différent de certains locaux. Cette différence est due principalement pour deux raisons. La première est le stockage de chaleur des différents matériaux présent dans les locaux. Chaque paroi ou mobilier influence la température du local, les analyses du chapitre 6 démontrent cette variation de température. Le confort thermique des occupants en est altéré, et c'est ce phénomène de surchauffe qui est le principal problème des bâtiments passifs. Il ne faut pas combattre ces surchauffes de la même manière dans tout le bâtiment. Tout au long des expériences, on a pu constater de grandes différences sur les besoins de chaleur ou de refroidissement des locaux. Cela est dû à l'orientation des façades, de l'utilisation de ces locaux et des gains internes. Ces différents paramètres varient et influencent le comportement thermique.

La deuxième raison est l'utilisation de toute une série de valeurs moyenne dans les calculs du PHPP, c'est l'aspect statique du programme. Le fait d'utiliser une température moyenne journalière au lieu d'une température qui varie chaque heure ou l'utilisation d'une valeur fixe et non variable dans le temps des gains internes a comme conséquence une harmonisation non correcte des locaux. Les gains internes influencés par la présence des employés, le nombre d'équipements en fonction et les interactions avec les autres locaux ont une grande influence dans le comportement global de ceux-ci. Chaque local se comporte différemment et a ses propres besoins.

Les rénovations de Besix avaient comme but de rendre son bâtiment passif et l'installation d'une ventilation double flux avec récupération de chaleur combinée avec une isolation de la toiture et un remplacement des luminaires sont de bonnes étapes. Cependant, l'objectif n'est pas atteint. L'isolation des parois restant en dessous des recommandations passives, la non-installation de protections solaires et la non-utilisation du free-cooling ne permet pas d'atteindre l'objectif du bâtiment passif. Les différentes propositions étudiées sur les locaux via la simulation dynamique ont permis de déterminer les travaux à réaliser afin d'avoir des résultats similaires à la certification passive.

Le free cooling par ouverture de fenêtres et les protections solaires sont indispensables à l'économie d'énergie. La proposition du free cooling par ouverture de fenêtres a pu mettre en avant tout le travail de la gestion des techniques. Cette gestion dépendra de la présence des employés, des critères de confort mais aussi des interactions avec les autres systèmes du bâtiment. Un bâtiment avec une optimisation de la ventilation sera beaucoup plus performant et permettra de meilleures économies.

Lors de rénovations ou de nouvelles constructions passives il y a deux aspects importants. Les travaux comprenant l'isolation, l'étanchéité, la ventilation mais aussi la gestion du bâtiment. Il faut accorder de l'importance à la gestion des gains internes et de la ventilation. C'est la distinction que nous pourrions faire entre un bâtiment passif et un bâtiment passif intelligent.

Les méthodes constructives sont connues et les recommandations sont testées et approuvées mais le domaine du passif a encore besoin de retour par rapport à la gestion du bâtiment. C'est cette gestion qui peut être précisément étudiée via les simulations dynamiques et ces simulations nous permettent de simuler un comportement réel de nos locaux. En adoptant les températures de consignes différentes en fonction des locaux, nous pouvons ainsi affiner les résultats énergétiques du bâtiment. Pour le moment, la simulation dynamique et statique est combinée lors de la réalisation de projets dans le domaine tertiaire.

Même si la simulation dynamique est plus complexe, elle devrait au fil du temps s'imposer de plus en plus dans la certification de par son aspect plus précis. De plus, la simulation dynamique peut être combinée avec un modèle BIM dès la conception du bâtiment. Chaque modification apportée pourra être analysée thermiquement afin de jauger les bénéfices ou inconvénients de ces modifications. Actuellement, la simulation dynamique est uniquement utilisée comme indication des performances du bâtiment. Toutefois, il semblerait judicieux d'y avoir également recours dans le dimensionnement des installations, car celle-ci apporterait un regard plus précis dans l'élaboration des bâtiments passifs.

## Sources Bibliographies

1. FFB. Réduire l'émission des gaz à effet de serre engendrée par le secteur du bâtiment : Base de propositions officielles de la Fédération Française du bâtiment. Février 2016; Available from: <http://www.batirpourlaplanete.fr/batiment-changement-climatique-lutte-comment/>.
2. Pachauri, R.K. and A. Reisinger, Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse. 2008: GIEC.
3. Massart, C. and A. De Herde, Elaboration d'un outil d'aide à la conception de maisons à très basse consommation d'énergie. 2010: Service Public de Wallonie. 159.
4. Plate-forme maison passive (pmp). 13 mai 2016; Available from: <http://www.maisonpassive.be>.
5. Le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). 2017; Available from: <http://www.cstc.be>.
6. Schöner, T., F. Antretter, and J. Radon, Monthly Balance Based Method Versus Transient Whole Building Energy Simulation for Passive House Design.
7. Lamotte, P., Bâtiments passifs : ils sont fous, ces Belges ?
8. Van Moeseke, G., Edification soutenable II - Partie HVAC. 2016, Université catholique de Louvain: Louvain-la-Neuve.
9. Gratia, E. and A. De Herde, Thermique des immeubles de bureaux. 2006, Louvain-la-Neuve: Presses universitaires de Louvain 319.
10. Obyn, S. and G. Van Moeseke, Compilation de gains internes : Valeurs globales et détaillées. 2015.
11. Karlsen, L., et al., Solar shading control strategy for office buildings in cold climate. *Energy and Buildings*, 2016. 118: p. 316-328.
12. Omrani, S., et al., Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools. *Building and Environment*, 2017.
13. SPF, E. Service public fédéral Emploi. Available from: <http://www.emploi.belgique.be>.
14. Énergie+, Architecture et Climat, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4. Disponible sur : <http://www.energieplus-lesite.be>
15. Van der Veken, J., et al. Comparison of steady-state and dynamic building energy simulation programs. in *Proceedings of the international Buildings IX ASHREA conference on*

the performance of exterior envelopes of whole buildings, Clearwater Beach, Florida 2004. 2004.

16. Ebert, R., Développement d'un environnement de simulation de systèmes complexes. Application aux bâtiments. 1993, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

17. Marc, A., Journée Thématique SFT, présentation TRNSYS. 2005.

18. SEL, T. and T. CSTB, Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild. 2004, TRNSYS.

19. Brun, A., et al. Behavioural comparison of some predictive tools used in a low-energy building. in Eleventh International IBPSA Conference. 2009.

20. Dan, D., et al., Passive house design—An efficient solution for residential buildings in Romania. *Energy for Sustainable Development*, 2016. 32: p. 99-109.

21. Coating, Research, and Institute, Decorative Indoor Paint for Thermal Comfort and Energy Saving. 2012.

22. Alizadeh, M. and S. Sadrameli, Development of free cooling based ventilation technology for buildings: Thermal energy storage (TES) unit, performance enhancement techniques and design considerations—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. 58: p. 619-645.

23. Plateforme Maison Passive asbl. (2009) Vade-Mecum PHPP 2012 (tertiaire) Version Juin 2012

24. IBGCE, Le photovoltaïque module 6 les différents types d'implantations. 2010.

## Chapitre 8 – Annexes

### Annexe 8.1 : Systèmes de ventilation

Le choix du système de ventilation afin d'assurer un confort hygiénique suffisant dépend de plusieurs facteurs comme l'usage du bâtiment (résidentiel ou tertiaire) ou le type de bâtiment (passif ou non).

Tout d'abord il y a deux grands types de systèmes de ventilation :

- La ventilation naturelle : système permettant d'assurer la ventilation sans mécanisme.
- La ventilation mécanique : système permettant d'assurer la ventilation via un ou plusieurs mécanismes

#### Système de ventilation naturelle : Système A

Le système A suivant la norme NBN D50-001 ne nécessite aucun ventilateur. L'air se déplace librement grâce aux différences de pressions induites par le vent venant frapper les façades du bâtiment. La circulation de l'air se produit de façon naturelle [14].

L'air pénètre dans le bâtiment via les inétanchéités présentes dans les différentes parois et via des amenées d'airs placés sur les façades (grilles, vasistas). Ensuite les transferts entre locaux se passent via des ouvertures de transferts (grilles, détalonnage des portes). Ces différents types de transfert ne permettent pas de contrôler le débit d'air car il est fonction du vent et ouvertures parasites. L'air est évacué par des conduits verticaux présents dans les locaux humides (sanitaires, cuisine,...) La Figure 26 représente le système A appliqué dans des bureaux.

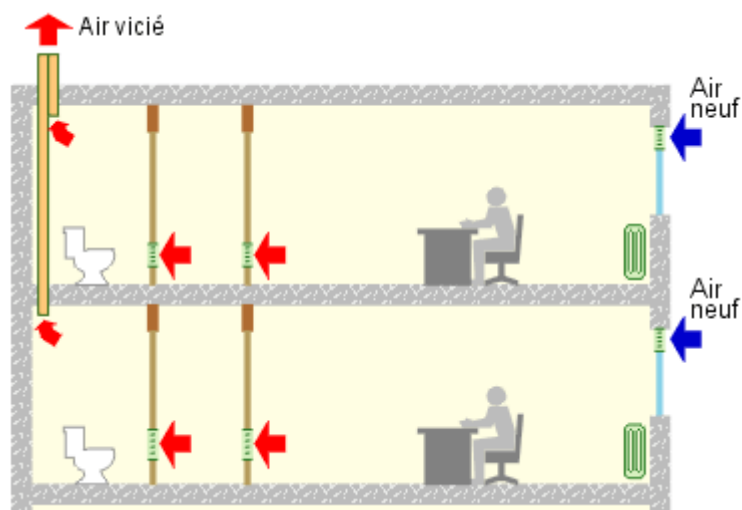


Figure 26 : Schéma Système A [14]

Avantages	Inconvénients
Aucune consommation électrique	Débits d'air recommandés difficilement atteignable
Économique et écologique	Qualité d'air non garantie
Peu d'entretien	Air neuf pas filtré
Pas bruyant	Esthétique défavorable

Tableau 25 : Avantages et inconvénients du système A [14]

### Système de ventilation mécanique simple flux : Système B et C

Une ventilation mécanique simple flux se distingue entre deux systèmes. Le système B qui consiste en une amenée d'air mécanique (pulsion) et une évacuation naturelle et le système C qui consiste en une amenée d'air naturelle et une évacuation mécanique. Le système le plus rencontré en simple flux est le système C car il est plus facilement applicable. Le principe d'amenée d'air est identique au système A mais l'air est extrait par des ventilateurs dans les locaux humides ou viciés. Il est nécessaire que ces locaux soient en dépression par rapport au reste du bâtiment afin que l'air soit attiré dans ceux-ci. [14] La Figure 27 illustre un système C de ventilation.

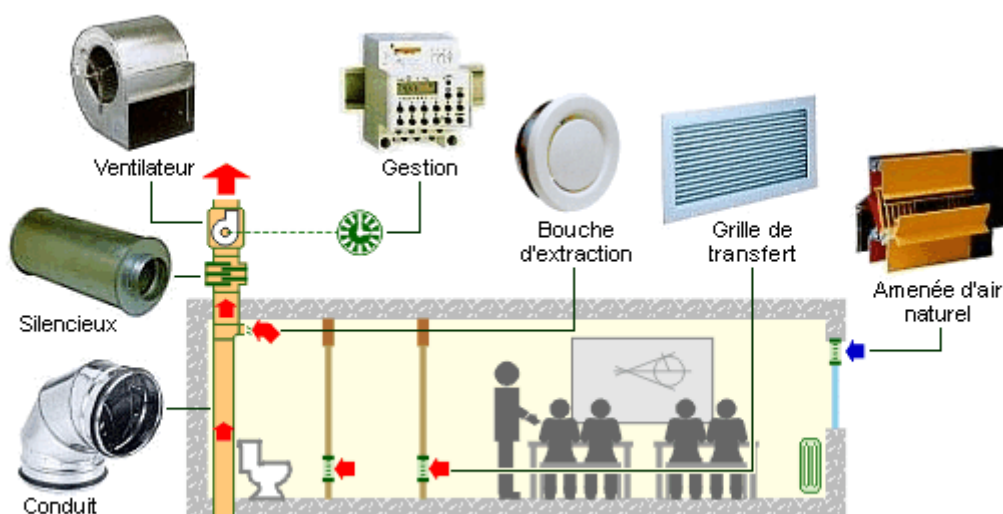


Figure 27 : Schéma système C [14]

Avantages	Inconvénients
Peu coûteuse	Rejet directement de l'air vers l'extérieur engendre des pertes énergétiques importantes
Peu de place dans les locaux techniques	Air neuf non filtré et non contrôlés
Débits d'air extrait contrôlés	Free-cooling non applicable
Facilité de mise en place	Esthétique défavorable

Tableau 26 : Avantages et inconvénients du système B et C [14]

### Système de ventilation mécanique double flux : Système D

La ventilation double flux consiste à réaliser une amenée et une extraction d'air mécanique. On pulse de l'air neuf dans les locaux propres (bureaux, séjour,...) et on extrait l'air dans les locaux humides ou viciés. Le groupe de ventilation de pulsion et extraction est généralement centralisé afin de n'avoir qu'un compartiment technique dédié à cela. Les conduites verticales et horizontales passent dans les faux plafonds et trémies du bâtiment, elles peuvent être placées parallèlement.

Les bouches de pulsion sont placées dans les murs ou faux plafonds et sont raccordées aux systèmes de soufflages. Différents systèmes peuvent compléter le système double flux comme un récupérateur de chaleur qui consiste à récupérer la chaleur de l'air extrait afin que l'air neuf soit préchauffé et un traitement de la température et de l'humidité de l'air [14]. La Figure 28 illustre un système D de ventilation

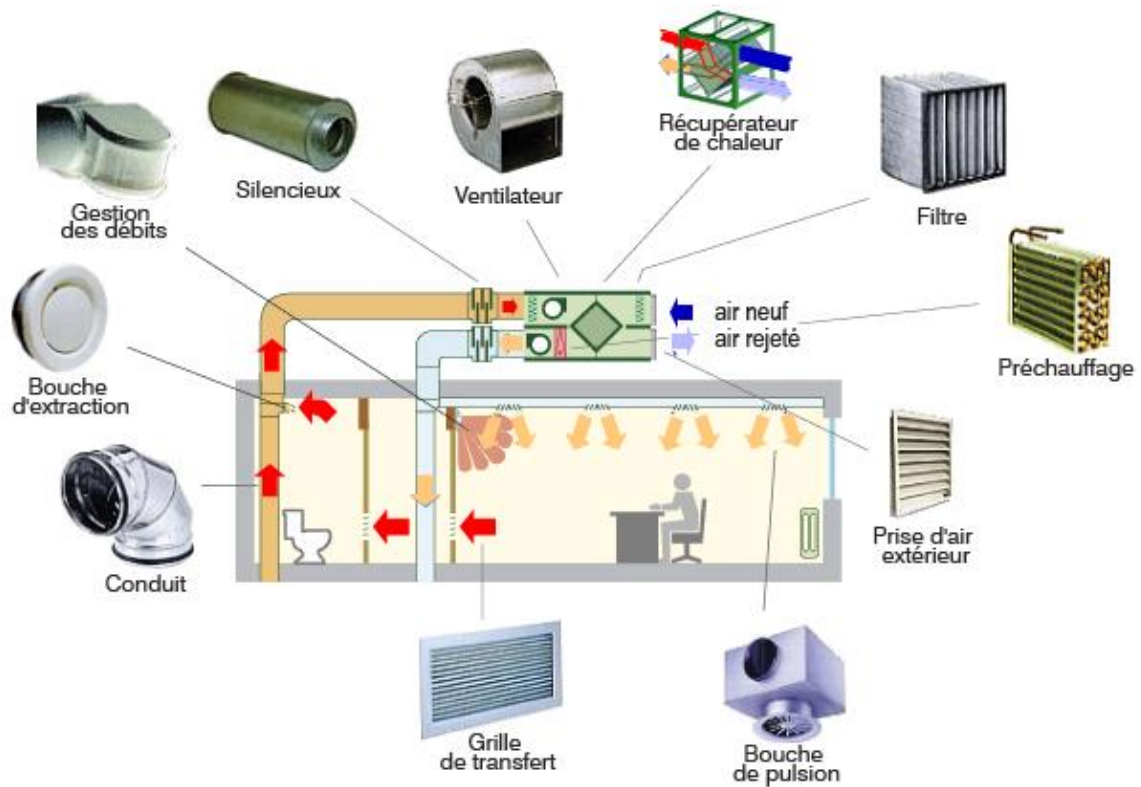


Figure 28 : Schéma système D [14]

Avantages	Inconvénients
Contrôle des caractéristiques de l'air neuf	Système couteux
Traiter l'air afin de l'amener à des conditions de confort	Pulsion d'air peut engendrer du bruit
Récupération de la chaleur de l'air extrait	Régulation complexe
Système le plus écologique	Nécessite une étanchéité du bâtiment performante

Tableau 27 : Avantages et inconvénients système D [14]

## Annexe 8.2 : Détails élévation Nord-Est

La figure représente les fenêtres de la façade Nord-Est du local OP01. Nous nous sommes basés sur les plans afin de définir les dimensions pour l'ouverture de fenêtres pour réaliser le free cooling.

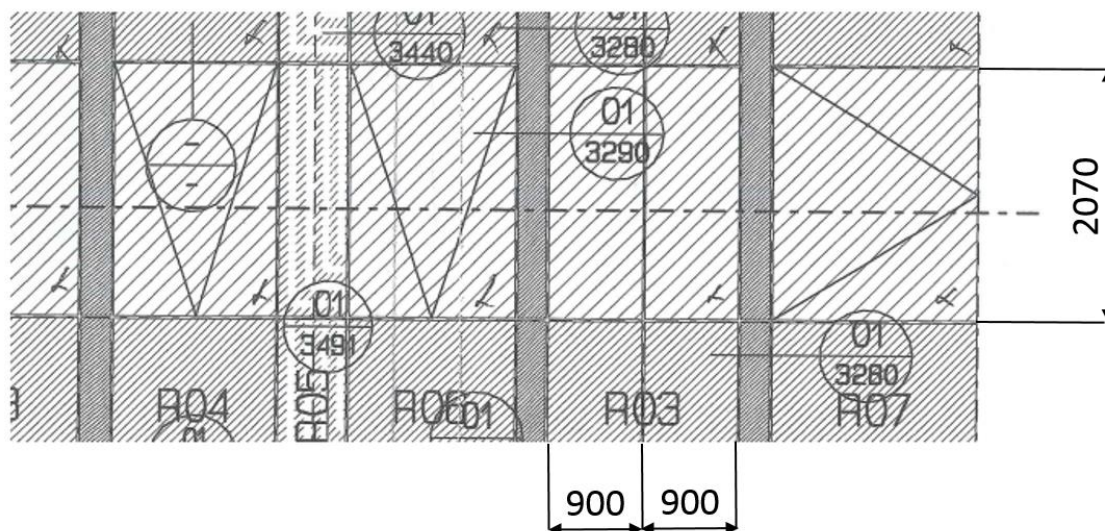


Tableau 28 : Façade Nord-Est avec les dimensions des fenêtres

### Annexe 8.3 : Schéma aéraulique

Le schéma suivant représente le système d'extraction existant avant la rénovation. L'air est extrait aux différents étages et est pulsé directement dans les niveaux inférieurs qui servent de parking. Cela permet de chauffer ces niveaux. Ensuite l'air est extrait dehors.

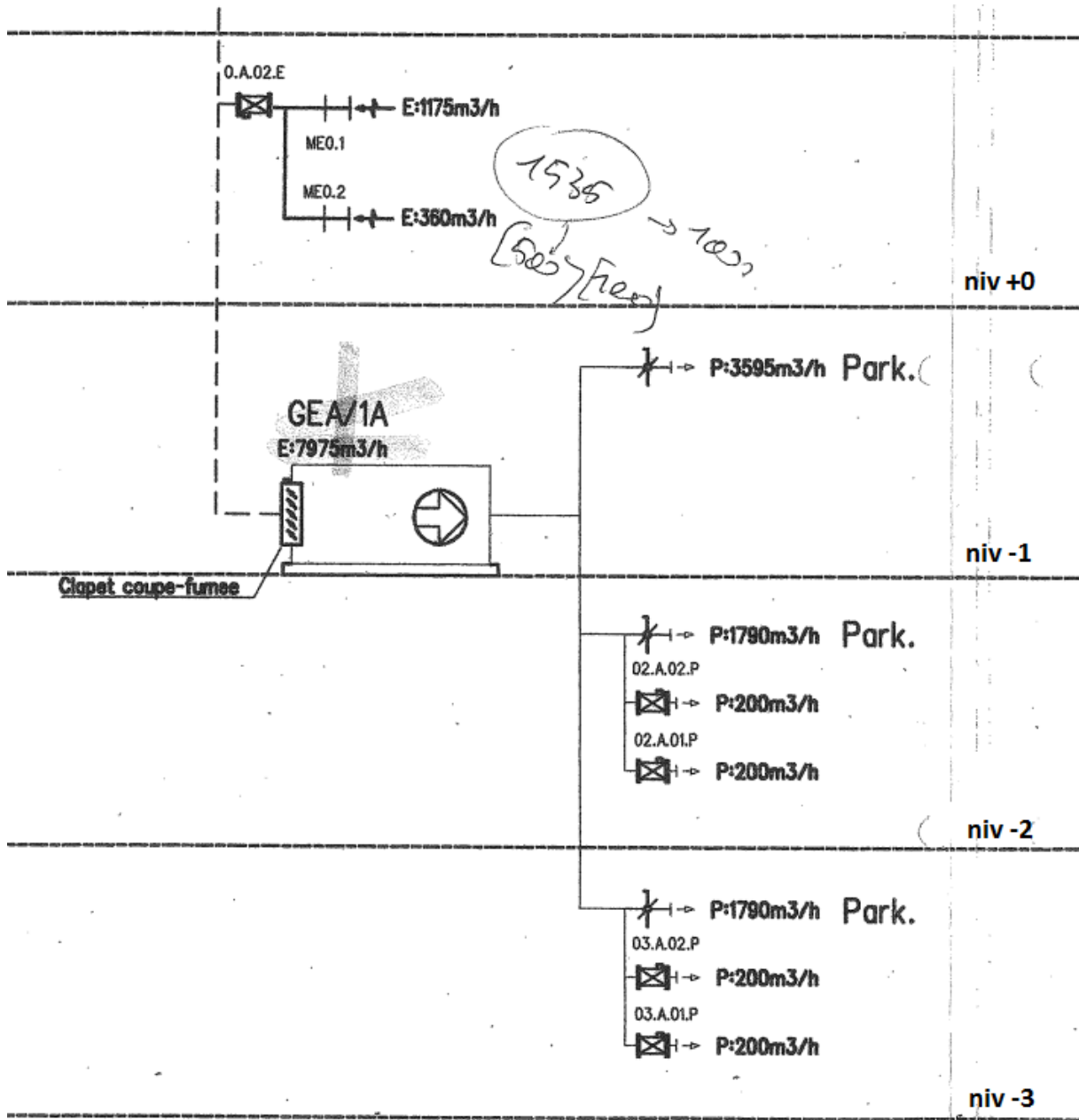


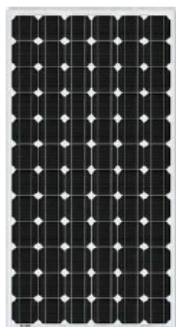
Tableau 29 : Schéma aéraulique du système d'évacuation d'air

## Annexe 8.4 : Panneau photovoltaïque



### BlueSolar Monocrystalline Panels

www.victronenergy.com



BlueSolar Monocrystalline 280W

- Low voltage-temperature coefficient enhances high-temperature operation.
- Exceptional low-light performance and high sensitivity to light across the entire solar spectrum.
- 25-year limited warranty on power output and performance.
- 5-year Limited warranty on materials and workmanship.
- Sealed, waterproof, multi-functional junction box gives high level of safety.
- High performance bypass diodes minimize the power drop caused by shade.
- Advanced EVA (Ethylene Vinyl Acetate) encapsulation system with triple-layer back sheet meets the most stringent safety requirements for high-voltage operation.
- A sturdy, anodized aluminum frame allows modules to be easily roof-mounted with a variety of standard mounting systems.
- Highest quality, high-transmission tempered glass provides enhanced stiffness and impact resistance.
- Pre wired quick-connect system with MC4 (PV-ST01) connectors. (Except for the 30W panel)



MC4 connectors

Article number	Description	Weight Kg	Electrical data under STC <sup>(1)</sup>				
			Nominal Power	Max-Power Voltage	Max-Power Current	Open-Circuit Voltage	Short-circuit Current
			P <sub>MPP</sub> W	V <sub>MPP</sub> V	I <sub>MPP</sub> A	V <sub>oc</sub> V	I <sub>sc</sub> A
SPM010301200	30W-12V Mono 430x545x25mm series 3a	2.5	30	18	1.67	22.5	2
SPM010501210	50W-12V Mono 645x540x35mm series 1b	5.2	50	18	2.78	22.2	3.16
SPM010801210	80W-12V Mono 1005x540x35mm series 1b	7	80	18	4.45	22.3	4.96
SPM031001200	100W-12V Mono 1195x545x35mm series 3a	8	100	18	5.56	22.4	6.53
SPM031301200	130W-12V Mono 1480x673x35mm series 3a	11.5	130	18	7.23	22.4	8.49
SPM011902400	190W-24V Mono 1580x808x35mm series	14.5	190	36	5.44	43.2	5.98
SPM033002400	300W-24V Mono 1956x992x45mm series 3a	24	300	36	8.06	45.5	8.56

Tableau 30 : Caractéristique du panneau photovoltaïque étudié

