

Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur architecte

**Systèmes de confort personnel (PCS) et le confort individuel dans les
espaces de bureaux partagés**

Emeline JORIS

Promoteurs:

Sergio ALTOMONTE

Geoffrey VAN MOESEKE

Lecteurs:

Olivier DARTEVELLE

Lionel HERINCKS

Préface

Vagues de chaleur, tempêtes, inondations : partout dans le monde, le changement climatique provoque des événements météorologiques de plus en plus intenses et fréquents. Ceux-ci ont des impacts de grande ampleur sur la planète, les habitants et, bien sûr, nos bâtiments !

Ces derniers sont conventionnellement exploités pour maintenir des conditions ambiantes intérieures homogènes afin de conserver des environnements thermiques et visuels confortables. Cependant, le maintien de ces conditions homogènes dans l'ensemble du bâtiment entraîne une consommation d'énergie inutile et ne répond pas aux besoins variables de confort thermique des différents occupants. C'est ce qui a conduit la communauté scientifique du bâtiment à rechercher des systèmes de contrôle individuel de l'environnement qui fonctionnent en association avec des systèmes de confort ambiant centralisés et adaptatifs.

Ces systèmes créent des conditions environnementales favorables autour de chaque occupant, en utilisant des équipements spécialisés, tels qu'un système de conditionnement thermique personnel, un éclairage d'appoint, une surveillance et un contrôle de la charge des prises, un système de contrôle des stores des fenêtres, et d'autres systèmes similaires.

La coordination entre les systèmes de contrôle personnel (PCS) et les systèmes de gestion centralisée des bâtiments permet de fournir de manière optimale des services tels que la climatisation, l'éclairage et d'autres services de ce type là où ils sont nécessaires, ce qui peut conduire à une efficacité énergétique importante et à une meilleure satisfaction des occupants.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès des expériences réalisées et qui m'ont aidées lors de la rédaction de ce présent mémoire :

Je voudrais dans un premier temps remercier mes promoteurs, Monsieur Geoffrey Van Moeseke et Monsieur Sergio Altomonte, pour leur flexibilité, leur accompagnement de qualité et leurs conseils judicieux, qui m'ont permis d'alimenter ma réflexion.

De même, Je remercie grandement les doctorants et chercheurs de l'équipe d'Architecture et Climat pour leur précieuse collaboration dans l'expérimentation nécessaire à mon étude. Leurs régularités dans les échanges, leurs réponses complètes aux questionnaires et aux feedbacks/interviews m'ont permis d'obtenir des résultats de qualité. Je les remercie sincèrement pour leur accueil chaleureux dans leur bureau et pour leurs conseils donnés au cours des discussions quotidiennes.

Table des annexes

- A. Questionnaire relevant les informations personnelles des volontaires
- B. Logbook

Table des illustrations

Deuxième partie

- 1.2.4. : FIGURE 1: Les différents échanges thermiques avec le corps humain (Bruxelles environnement, n.d.)
- 1.3.1. : FIGURE 2: Echelle de sensation thermique (Energie+, 2007)
- 1.3.1.1. : FIGURE 3: Diagramme Psychrométrique pour un confort optimal (Energie+, 2007)
- 1.3.1.2. : FIGURE 4: Plages de confort pour une activité de bureau et un habillement d'été ou d'hiver, selon l'ASHRAE Handbook of Fundamentals Comfort Model, 2005 superposées au climat de Bruxelles. (Energie+, 2007)
- 1.3.2.2. : FIGURE 5: Représentation des mécanismes adaptatifs (De Dear, 2003) Indice PMV – PPD de confort thermique (BeSwic, 2016)
- 2.2.1. : FIGURE 6: Indice PMV – PPD de confort thermique (BeSwic, 2016)

Troisième partie

- 4.1. : FIGURE 1: Centrale d'acquisition TESTO 480
- FIGURE 2: Contrôleur de température et timer
- FIGURE 3: Radiateur électrique
- FIGURE 4: Couverture électrique
- FIGURE 5: Cable chauffant
- FIGURE 6: Panneau infrarouge
- FIGURE 7: Panneau radiant

4.2. : FIGURE 8: Tableau reprenant les informations personnelles des volontaires

FIGURE 9: Plan du rez-de-chaussée du bâtiment Vinci

FIGURE 10: Plan du local de l'expérience (A017)

4.3. : FIGURE 11: Mise en place du matériel de l'appareil TESTO 480

4.4. : FIGURE 12: Températures collectées dans le local A017 pour la période du 8-02 au 17-02 2022

FIGURE 13: Table climatique pour Louvain-la-Neuve, Février 2022 - (Météo Pour Louvain-La-Neuve En Février 202: Températures et Table Climatique - Climate-Data.Org2, n.d.)

FIGURE 14: Températures collectées dans le local A017 pour la journée du 15-02

FIGURE 15: Valeurs de température et d'humidité relative collectées dans le local A017 pour la période du 8-02 au 17-02 2022

FIGURE 16: Extrait du Logbook

FIGURE 17: Tableau reprenant l'indice "clo" de chaque vêtement pris séparément (Parkinson & de Dear, 2016)

5. : FIGURE 18: Valeurs de températures/PMV collectés dans le local A017 pour la période du 8-02 au 17-02 2022

FIGURE 19: Valeurs de PPD collectés dans le local A017 pour la période du 8-02 au 17-02 2022

FIGURE 20: Valeurs de PMV et du suivi de l'occupant A collectés dans le local A017 pour la période du 8-02 au 7-03 2022

FIGURE 21: Valeurs de PMV et du suivi de l'occupant C collectés dans le local A017 pour la période du 8-02 au 7-03 2022

FIGURE 22: Valeurs de PMV et du suivi de l'occupant A collectés dans le local A017 pour la période du 13-02 au 17-02 2022

FIGURE 23: Valeurs de températures et du suivi de l'occupant A collectés dans le local A017 pour la période du 13-02 au 17-02 2022

FIGURE 24: Valeurs de PMV, du suivi de l'occupant A et températures de déclenchement des actions collectés dans le local A017 pour la période du 13-02 au 17-02 2022

FIGURE 25: Valeurs de PMV et du suivi de l'occupant C collectés dans le local A017 pour la période du 8-02 au 17-02 2022

FIGURE 26: Valeurs de températures et du suivi de l'occupant C collectés dans le local A017 pour la période du 13-02 au 17-02 2022

FIGURE 27: Valeurs de PMV, du suivi de l'occupant A et températures de déclenchement des actions collectés dans le local A017 pour la période du 13-02 au 17-02 2022

Table des matières

Première partie: Introduction - Objectifs	11
Annonce	14
Deuxième partie: Etat de l'art	16
1. Le confort thermique	16
1.1. L'aspect physiologique: la thermorégulation	16
1.1.1. La thermorégulation végétative	17
1.2. L'aspect physique: les échanges de chaleur	18
1.2.1. Le bilan thermique	18
1.2.2. La production de chaleur : le métabolisme	18
1.2.3. Les échanges de chaleur sensible	19
1.2.4 Les échanges de chaleur latente : l'évaporation	20
1.3. Les modèles du confort thermique	21
1.3.1. Le modèle de Fanger : PMV & PPD (Predicted Percentage Dissatisfied)	21
1.3.1.1 Les 6 paramètres traditionnels du confort thermique	22
1.3.1.2 Indicateurs et plages de confort	25
1.3.2 Le modèle de confort adaptatif	26
1.3.2.1. L'adaptation thermique : principe et mécanismes	26
1.3.2.2. L'opportunité adaptative - contraintes et restrictions	28
2. Au delà du modèle PMV et adaptatif	30
2.1. Variables d'entrée très spécifiques, coûteuses et difficiles à obtenir	30
2.2. Performances prédictives moyenne	31
2.2.1. L'indice PPD	31
2.3. Manque de contexte aux données recueillies	32

3. Environnement thermique dynamique	33
3.1. Normes de construction et les systèmes de certification	35
4. Modèles de confort personnel	35
5. Systèmes de confort personnel (PCS)	36
5.1. Les PCS pour les différences de préférences thermiques entre les occupants des espaces partagés	37
5.2. Les PCS pour les différences de genres	38
6. Alliesthésie	39
6.1. L'alliesthésie temporelle	39
6.2. L'alliesthésie spatiale	39
Troisième partie: Expérimentation	41
1. Question de recherche, contexte et hypothèse	41
2. Dispositions de l'expérience	41
3. Justification des différents PCS	42
4. Cadre de la recherche, étapes spécifiques	42
4.1. Sélectionner quels types, combien et/ou quelles combinaisons de PCS tester lors de l'étude	42
4.2. Constituer un échantillon de volontaires	45
4.3. Soumettre les volontaires à un environnement dynamique en leur donnant la possibilité de réajuster leur bien-être grâce aux PCS	48
4.4. Collecter les données et vérifier les hypothèses	49
5. Résultats	56
5.1. L'interview semi-structurée	64
6. Discussion	66
6.1 Effets du chauffage local sur la perception thermique	66
6.2 Les décisions personnelles de réglage	67
	9

6.3 Conséquence psychologique de la pandémie du COVID 19 sur le bien-être	67
7. Conclusion	68
Quatrième partie: Annexes	70
Cinquième partie: Bibliographie	71

Première partie: Introduction - Objectifs

Le confort thermique contribue à la satisfaction générale, au bien-être et aux performances. Ce dernier est un paramètre important dans le processus de conception des bâtiments car l'homme moderne passe la majeure partie de la journée à l'intérieur (Saini et al., 2020). Dans les années 1970 et 1980, le développement et l'utilisation de modèles d'équilibre énergétique du corps humain ont fait partie du domaine de la biométéorologie humaine. Le contributeur le plus important est Mr Fanger (1934-2006), qui a créé un modèle prédictif pour le confort thermique général à partir de recherches en laboratoire et en chambre climatique. Avec son travail, Fanger voulait présenter une méthode utilisable par les ingénieurs en chauffage et climatisation pour prédire, pour n'importe quel type d'activité et de vêtement, toutes les combinaisons de facteurs thermiques dans l'environnement pour lesquelles le plus grand pourcentage possible d'un groupe donné de personnes expérimente le confort thermique. Elle a fourni une solution pour prédire la température optimale pour un groupe, négligeant toutes variabilités.

Dans le cadre de ce travail, nous définissons le confort comme "l'état d'esprit qui exprime la satisfaction à l'égard de l'environnement [...] et qui est évalué par une appréciation subjective" (ASHRAE Standard 55, 2013). Il peut être considéré comme étant la satisfaction liée à la perception individuelle, à l'acceptation des conditions environnementales (ressenti à un moment donné) (Altomonte et al., 2020). Le bien-être quant à lui, qu'il soit physique ou psychique, peut être défini comme un état agréable mais transitoire, procuré par la satisfaction des besoins du corps et par la tranquillité de l'esprit (Dictionnaire médical, n.d.).

Les interventions sur le mode de vie, qui permettent d'éviter la prévalence croissante du syndrome métabolique, sont généralement axées sur la nutrition et l'activité physique. Les facteurs environnementaux sont à peine abordés. Étant donné que nous passons en moyenne plus de 90 % de notre temps à l'intérieur (Saini et al., 2020), il nous paraît plus pertinent de s'intéresser à ces facteurs. Dans l'environnement bâti, l'attention s'est longtemps limitée à l'évaluation et à l'optimisation de la performance des bâtiments et au confort des occupants.

Ce n'est que récemment que le bien-être et la santé des occupants des bâtiments ont été pris en compte dans une certaine mesure. Cependant, bien qu'il figure parmi les objectifs déclarés des codes réglementaires et des systèmes d'évaluation volontaires, de nombreuses questions

subsistent quant à la manière de concevoir, de mesurer et d'entretenir efficacement le bien-être dans les lieux que nous habitons (Altomonte et al., 2020). Les aspects réels de la santé métabolique ne sont généralement pas couverts. Dans ce travail de fin d'études, nous attirons l'attention sur le potentiel de l'environnement intérieur, un facteur souvent négligé dans le mode de vie. Plus précisément, nous passons en revue les connaissances actuelles et les développements de nouvelles idées sur les effets de la température ambiante, du potentiel d'action des occupants des espaces intérieurs et l'interaction des deux sur la santé métabolique. La littérature montre que les effets des facteurs environnementaux intérieurs sont des facteurs supplémentaires importants pour un mode de vie sain et ont un impact sur la santé métabolique.

Actuellement, sur le lieu de travail, il est difficile de trouver un équilibre entre la réduction de la performance énergétique des bâtiments et l'amélioration du confort des utilisateurs. La tendance à la conception de bâtiments économes en énergie se poursuit depuis plusieurs décennies et a été récemment accentuée par la prise de conscience croissante du changement climatique et d'autres défis environnementaux par les différents acteurs du secteur (qu'ils soient décideurs politiques, promoteurs, ingénieurs, utilisateurs, architectes ou chercheurs). Le secteur du bâtiment représente actuellement jusqu'à 40% de la consommation d'énergie primaire dans de nombreux pays et constitue une source importante d'émissions à effet de serre (Heating, Ventilation and Air Conditioning Guide, 2020) et une grande partie de celle-ci est destinée au chauffage, à la ventilation et à la climatisation. En outre, malgré l'énergie considérable utilisée pour assurer le confort et la satisfaction de l'environnement thermique, le mauvais confort thermique est l'une des plaintes les plus courantes des utilisateurs de bâtiments de bureaux (R. J. de Dear et al., 2013).

De nombreuses études se situent à l'extrême des deux, en ce sens qu'elles sont soit efficaces sur le plan énergétique, soit elles fournissent des niveaux élevés de confort pour l'utilisateur. L'un ou l'autre engendre des difficultés pour l'autre extrémité (Shahzad et al., 2016). Le contrôle thermique dans un bureau partagé est un défi, en raison des différences individuelles dans la perception de l'environnement thermique. Les décisions personnelles de réglage de la température ambiante ou de la ventilation dans le bureau (comme l'ouverture d'une fenêtre ou la modification des réglages du thermostat) ont un impact direct sur le confort des autres occupants, qui aspirent à d'autres réglages.

Ce travail de fin d'étude présente une étude vérifiant l'impact de l'utilisation des systèmes de confort personnel (PCS) comme aide pour le confort individuel dans les espaces de bureaux partagés. Cependant, dans le cadre de ce TFE, les performances de ces systèmes de contrôle personnalisés sont analysées dans un environnement thermique dynamique. La question de recherche de ce travail est : "Dans un contexte de développement durable, à quel point les dispositifs personnels de confort peuvent-ils agir sur le confort des sujets travaillant dans un espace de bureau partagé ?". Cela sera expérimenté sur quatre volontaires dans un local de la cellule de recherche "Architecture et climat" situé dans le bâtiment Vinci de la faculté d'architecture à Louvain-La-Neuve.

Annonce

Dans ce travail de fin d'étude, s'articulent différentes parties reprenant divers chapitres.

L'étude de la littérature concernée dans cette recherche est reprise dans la deuxième partie.

Pour débiter, le premier chapitre reprend les notions générales du confort thermique selon deux aspects distincts tels que l'aspect physiologique et l'aspect physique. Les différents échanges thermiques avec le corps humain sont également présentés et illustrés. Pour conclure cette section, deux modèles de confort thermiques sont synthétisés. Premièrement le modèle du confort adaptatif, prenant en compte la capacité d'action de l'occupant sur son environnement (occupant actif) et deuxièmement celui de Fanger (PMV-PPD). Le PMV est un indice qui vise à prédire la valeur moyenne des votes d'un groupe d'occupants sur une échelle de sensation thermique en sept points.

Les limites de ce dernier modèle sont argumentées dans la deuxième section. En effet, l'application de ce modèle a souvent conduit à un climat intérieur uniforme car ces normes de température intérieure sont calculées sur base de l'hypothèse d'un "occupant moyen" . En pratique, cela signifie que l'environnement thermique est constant tout au long de la journée et pendant toutes les saisons.

Ensuite, nous irons encore plus loin dans l'optimisation du confort thermique des occupants des espaces de bureaux partagés. L'occupant peut tolérer le changement et la variation de l'ambiance lorsqu'il a une opportunité adaptative élevée. L'application de ce modèle adaptatif permet d'obtenir un climat intérieur plus dynamique.

La section suivante expose les recherches antérieures montrant que les variations de température peuvent avoir des effets positifs sur la santé métabolique et le bien-être des occupants..

Pour poursuivre, nous aborderons les systèmes de confort personnel (Personal Comfort Systems-PCS), qui, utilisés à bon escient, peuvent permettre d'atteindre des conditions de confort au niveau personnel de part le plaisir psychologique de pouvoir modérer soi-même l'ambiance thermique environnante et le contentement de ressentir des stimuli thermiques proche. Ce phénomène prend le nom "d'alliesthésie". Il fait référence à la réponse de plaisir

qui accompagne la correction des déséquilibres thermiques entre les différentes parties du corps. Nous verrons dans la suite de ce travail, l'utilisation des systèmes de confort personnel (PCS) comme aide pour le bien-être individuel dans les espaces de bureaux partagés.

La troisième partie concerne l'expérimentation. Les différentes étapes de la méthodologie y sont développées. L'expérience de ce mémoire consiste à déterminer si, dans un environnement dynamique, les systèmes de confort personnel peuvent élargir la plage de température acceptable et garantir la perception du confort dans un espace de bureau partagé. Pour cela, les occupants peuvent choisir leurs vêtements, ouvrir une fenêtre, la porte et utiliser les PCS (couvertures chauffantes, fils chauffants, panneaux de 300 WATTS, panneaux radiants de 1200 WATTS,..) comme ils le souhaitent.

Deuxième partie: Etat de l'art

1. Le confort thermique

Notre confort thermique est directement lié au besoin du corps humain à maintenir sa température interne aux alentours de 37 °C en moyenne quelles que soient les conditions d'ambiance ou l'activité physique. Le corps humain possède un système de thermorégulation composé de différents mécanismes en vue de maintenir cette température corporelle constante et de garantir le bon fonctionnement de nos organes vitaux. L'homme produit de la chaleur mais en perd également dans le but de s'adapter à l'environnement dès lors que les conditions thermiques environnantes changent. Dans une certaine mesure, le confort lié à l'équilibre thermique est atteint lorsque la production interne de chaleur dans le corps est égale à la perte de chaleur essayée vers l'ambiance extérieure (Energie+, 2007).

1.1. L'aspect physiologique: la thermorégulation

Le maintien de la vie au niveau cellulaire, des différents organes et de l'activité musculaire nous demandent de dépenser de l'énergie en permanence. Celle-ci est majoritairement dégagée sous forme de chaleur et se propage de l'intérieur vers l'extérieur du corps. En général, la température du noyau central est de l'ordre de 37 °C alors que la température de la peau est comprise entre 29-30 °C aux pieds et entre 34-35 °C au niveau de la tête. Ces températures varient en fonction des perturbations internes et externes.

La température interne varie essentiellement en fonction de l'activité de l'individu. En effet, les déplacements et activités de l'homme stimulent les muscles. Ces derniers engendrent donc de la chaleur dans l'organisme ; cette chaleur est transportée via le sang, elle est donc distribuée uniformément et modifie la température interne.

L'homme dispose d'un système dynamique de thermorégulation qui permet de contrôler et réguler les échanges de chaleur interne et externe du corps humain (système régulé passif), afin de maintenir les températures du corps.

On distingue deux types de thermorégulation : d'une part la thermorégulation physiologique végétative qui a pour but de garder la température interne du corps aux alentours de 37°C, et d'autre part, la thermorégulation comportementale, consciente ou inconsciente, permettant d'anticiper les changements rapides dans l'environnement afin de limiter les réactions physiologiques perçues comme désagréables. (Campbell, 2008)

1.1.1. La thermorégulation végétative

Le système de thermorégulation végétative vise à assurer la régulation dynamique de la température du corps humain (GUIDEnR HQE, l'information Haute Qualité Environnementale, n.d.). Les deux variables contrôlées sont la température interne et la température cutanée. La température interne est maintenue à une valeur proche de 37 °C alors que la température moyenne de la peau avoisine les 34 °C en condition standard. Il convient de noter que contrairement à la température interne qui varie peu (2 à 3 °C), les températures cutanées sont soumises à l'environnement extérieur et encourent des variations thermique pouvant aller jusqu'à 10 °C.

Le principe de régulation consiste à comparer des signaux en provenance des capteurs internes et cutanés à des valeurs de référence, et d'ordonner des actions de réponses selon les écarts de températures détectés.

Face au froid, on retrouve ce qu'on appelle la vasoconstriction (diminution du diamètre des vaisseaux sanguins). Ce phénomène permet de réduire le débit sanguin vers la peau afin de diminuer la température cutanée et par conséquent les échanges thermiques avec le milieu extérieur. Si le froid persiste, l'organisme augmentera sa production de chaleur interne par des contractions musculaires (les frissons)(Campbell, 2008).

Au contraire, face au chaud, le diamètre des vaisseaux sanguins augmentera. Ce mécanisme s'appelle la vasodilatation. Elle intensifie le débit sanguin expédié vers la peau et augmente la température cutanée favorisant les échanges thermiques avec l'extérieur. Si la chaleur persiste, l'organisme procède à la sudation.

1.2. L'aspect physique: les échanges de chaleur

Comme la température interne du corps humain oscille autour de 37°C, il est nécessaire de la maintenir en équilibre thermique avec son environnement. Les fluctuations dans les conditions externes et internes impliquent un état d'équilibre dynamique, l'homéostasie.

Si la chaleur produite dans le corps dépasse celle perdue à l'environnement, le corps se réchauffe et sa température interne s'élève et dans le cas inverse, il se refroidit avec un abaissement de sa température interne.

1.2.1. Le bilan thermique

La chaleur métabolique produite dans le corps peut être stockée dans celui-ci. En fonction de l'intensité, l'organisme se réchauffe ou se refroidit. Le bilan thermique du corps s'articule de la façon suivante (Nicol et al., 2012) :

$$M - W = Q_{SK} + Q_{RES} + S$$

- M = taux du métabolisme, W/m^2
- W = travail externe, W/m^2
- Q_{RES} = flux de chaleur échangé par voie respiratoire, W/m^2
- Q_{SK} = flux de chaleur échangé à la surface cutanée, W/m^2

La chaleur produite par le corps est dissipée dans l'environnement à travers la surface cutanée et par voie respiratoire sous forme de chaleur sensible et latente. La convection, le rayonnement et la conduction sont les trois modes d'échange de chaleur sensible à la surface cutanée, la chaleur latente est reprise par évaporation de la sueur à la surface de la peau. La ventilation respiratoire dissipe la chaleur du corps par convection (chaleur sensible, modifiant la température d'une matière) et par évaporation (chaleur latente, modifiant l'état physique d'une matière) (GUIDEnR HQE, l'information Haute Qualité Environnementale, n.d.).

1.2.2. La production de chaleur : le métabolisme

La production de l'énergie métabolique est le reflet de la vie cellulaire qui résulte de la consommation d'oxygène et du dégagement du gaz carbonique. Cette énergie est dégagée essentiellement sous forme de chaleur.

Une partie du métabolisme est utilisée par les muscles pour le travail externe qui est défini en fonction du métabolisme. La chaleur métabolique est alors obtenue en déduisant le travail externe du taux de métabolisme.

Le métabolisme est également influencé par la thermorégulation. Les frissons peuvent multiplier sa valeur jusqu'à 4 à 5 fois par rapport à une personne qui ne frissonne pas.

En plus, la thermorégulation comportementale peut avoir des effets non négligeables dans les conditions chaudes et froides. Dans les situations chaudes, les individus peuvent s'adapter en réduisant la vitesse de leurs mouvements, ceci se traduit par une réduction du métabolisme de près 10 %.

Les bases du phénomène de transfert de chaleur permettent de décrire les différents mécanismes des échanges de chaleur sensible et latente, alors que les expressions empiriques sont utilisées pour déterminer les valeurs des coefficients d'échange de chaleur. Des expressions empiriques sont aussi utilisées pour décrire les mécanismes de régulation thermo physiologique en fonction de la température interne et la température cutanée.

1.2.3. Les échanges de chaleur sensible

Les trois modes d'échange de chaleur sensible sont la conduction, la convection et le rayonnement. Les échanges par conduction sont souvent négligés étant donné que les zones corporelles concernées sont restreintes. De plus, quand des parties plus grandes de la surface corporelle sont en contact avec des éléments de mobilier (chaise, fauteuil, canapé, lit), les tissus en contact se mettent rapidement en équilibre et se comportent comme un isolant thermique par rapport à l'ambiance. Les éléments de mobilier sont souvent représentés par une valeur additionnelle sur l'isolation vestimentaire.

A. La conduction

La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement appréciable de matière. C'est en fait l'agitation thermique qui se transmet de proche en proche.

B. La convection

La convection correspond aux échanges de chaleur entre le corps et l'air environnant. Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, peau ou vêtement. Si l'air est plus froid, le corps se refroidit par le mouvement de l'air qui se réchauffe au contact du corps et inversement lorsque l'air est plus chaud que la surface en contact.

C. Le rayonnement

L'échange radiatif est le mode d'échange de chaleur entre deux corps par ondes électromagnétiques à distance. Le corps humain ainsi que les parois qui l'entourent émettent en permanence une chaleur radiative. Si le rayonnement reçu par le corps est supérieur à sa propre émission, le corps se réchauffe, et se refroidit dans le cas inverse.

1.2.4 Les échanges de chaleur latente : l'évaporation

L'évaporation est le mode d'échange de chaleur dû au changement d'état de l'eau. Elle est le moyen essentiel pour évacuer la chaleur dans les ambiances chaudes par évaporation de la sueur à la surface cutanée. Le système de thermorégulation détermine le débit de sueur nécessaire pour conserver l'équilibre thermique du corps.



FIGURE 1: Les différents échanges thermiques avec le corps humain (Bruxelles environnement, n.d.)

1.3. Les modèles du confort thermique

Le confort thermique est un objectif important pour l'environnement bâti car il affecte la satisfaction des occupants (Wagner et al., 2007), leur santé (Allen et al., 2015) et leur productivité. Pour comprendre ce qui rend un environnement thermiquement confortable pour les occupants, les chercheurs se sont concentrés sur le développement de modèles empiriques qui peuvent représenter la perception humaine du confort thermique en termes de conditions ou de facteurs donnés (par exemple, personnels, environnementaux, etc.).

Il existe deux modèles principaux qui sous-tendent la pratique actuelle de la gestion du confort dans les bâtiments : le vote moyen prédit (Predicted Mean Vote, PMV) et les modèles adaptatifs.

1.3.1. Le modèle de Fanger : PMV & PPD (Predicted Percentage Dissatisfied)

Dans les années 1970, Fanger a établi une méthode d'analyse et d'évaluation de l'ambiance thermique en vue de déterminer les conditions de confort thermique. Cette méthode traite le confort thermique comme un phénomène physico-physiologique et exprime la sensation thermique humaine comme un résultat du transfert de chaleur entre un corps humain et son environnement. Cette dernière, relevant du modèle analytique, est la plus utilisée et a permis de développer la norme ISO 7730 (ISO 7730:2005, n.d.) et ASHRAE 55 (ASHRAE Standard 55, 2013).

La méthode de Fanger vise à déterminer, de façon analytique, les échanges de chaleur entre l'individu et l'environnement. Elle établit un indice, le « PMV » (Predicted Mean Vote) (Fanger, 1973), qui tend à prédire l'appréciation de sensation thermique (globale) d'un important groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE (*ASHRAE Standard 55*, 2013). La relation a été déterminée statistiquement à partir d'études expérimentales, en chambres climatiques, sur un grand échantillon d'individus. Ce modèle utilise un bilan thermique en régime permanent pour prédire la sensation thermique de l'occupant en fonction de six paramètres, à savoir la température de l'air, la température radiante moyenne, l'humidité relative, la vitesse de l'air, l'isolation des vêtements de l'occupant et le taux métabolique.

L'échelle de sensation thermique utilisée par le modèle PMV s'exprime par:

- Une valeur de PMV de zéro qui exprime une sensation de confort thermique neutre,
- Une valeur de PMV négative qui exprime une Sensation thermique plus basse que la température neutre,
- Une valeur de PMV positive qui exprime Sensation thermique plus haute que la température neutre,

+3	chaud
+2	tiède
+1	légèrement tiède
0	neutre
-1	légèrement frais
-2	frais
-3	froid

FIGURE 2: Echelle de sensation thermique (Energie+, 2007)

On estime que la plage de confort thermique s'étale de légèrement frais (- 1) à légèrement chaud (+ 1), soit de -1 à + 1 (Energie+, 2007).

1.3.1.1 Les 6 paramètres traditionnels du confort thermique

A. Le métabolisme

Le métabolisme est exprimé par la production de chaleur interne au corps humain qui permet de la maintenir autour de 37°C. Cette température peut être différente de la température d'ambiance, c'est pourquoi le métabolisme de l'homme agit afin de maintenir un certain équilibre thermique et d'assurer son bien-être (Nicol et al., 2012).

De manière globale, pratiquer une activité abaisse le niveau d'exigence thermique de l'individu. Plus l'activité est intense et plus les besoins de chaleur thermique seront bas (car la production de chaleur métabolique augmente) et inversement.

B. L'habillement

L'habillement joue également un rôle dans le confort thermique de l'homme. En effet, le vêtement influence les échanges de chaleur en modifiant les coefficients de convection, de rayonnement et d'évaporation entre la surface de la peau et l'environnement (Fanger, 1988).

C. La température opérative de l'air

La température opérative est la température ressentie par l'occupant. Elle prend en compte la température de l'air dans la zone d'occupation et les effets de rayonnement. De manière simplifiée, on dit qu'elle est égale à la moyenne entre la température moyenne pondérée des surfaces du local et la température de l'air (Température Opérative, n.d.).

D. La température radiante moyenne des parois

Cette température correspond à la moyenne pondérée des températures des murs, dalles, plafonds et ouvrants. Plus le bâtiment est déperditif et donc faiblement isolé, plus cette température est faible. On observera alors des phénomènes de parois froides.

E. La vitesse de l'air

La vitesse de l'air influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau.

À l'intérieur des bâtiments, on considère généralement que l'impact sur le confort des occupants est négligeable tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s.

F. L'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air (HR) est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau qui peut être contenue dans l'air à une température donnée et la quantité maximale d'eau contenue à la même température. L'humain peut difficilement discerner s'il fait 40 % ou 60 % d'humidité relative dans l'environnement où il se trouve. Cependant, il peut ressentir une

sensation d'inconfort lorsque l'humidité relative est inférieure à 30 % car un faible taux d'humidité entraîne certains désagréments comme par exemple :

- L'augmentation de l'électricité statique
- La gêne et irritation des voies respiratoires
- L'augmentation de la concentration en poussières dans l'air (susceptible d'induire une augmentation de la fréquence de maladies respiratoires en hiver lorsque l'humidité de l'air est faible)

De même, un niveau d'humidité de plus de 70 % peut être ressenti comme inconfortable par l'occupant car cela diminue la capacité de dissiper la chaleur par transpiration de la peau.

A ce titre, on peut définir une plage de confort hygrothermique dans le diagramme suivant. Le diagramme psychrométrique représente graphiquement les principales caractéristiques physiques et thermodynamiques de l'air humide pour une pression donnée.

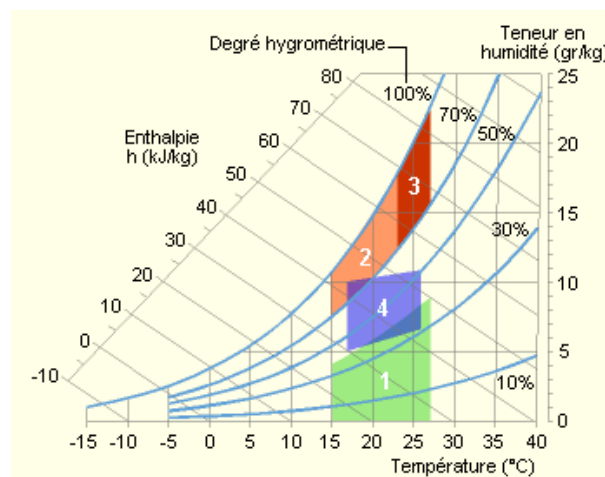


FIGURE 3: Diagramme Psychrométrique pour un confort optimal (Energie+, 2007)

L'axe horizontal représente l'axe de température sèche

La température sèche est mesurée dans un environnement sec. Elle s'exprime en degrés Celsius (°C). L'axe est gradué de -15°C à 40°C. Toutes les lignes verticales parallèles à l'axe, appelées isothermes, représentent donc des zones à température sèche constante.

L'axe vertical représente l'axe d'humidité absolue ou teneur en humidité

L'humidité absolue correspond à la quantité de vapeur contenue dans 1 kilogramme d'air sec.

Elle est notée w et s'exprime en kilogramme de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec (kg/kg_{gas}). L'axe est gradué de 0 g/kg à 25 g/kg. Les lignes horizontales parallèles à l'axe représentent donc des données à teneur en humidité constante et sont appelées isohyde

La courbe d'humidité relative ou hygrométrie

L'humidité relative correspond au rapport entre l'humidité absolue de l'air étudié et l'humidité maximale (absolue de saturation). Elle est notée H_r et s'exprime en pourcentage (%). Toutes les courbes qui suivent celle tracée sur le diagramme sont nommées iso-degré et correspondent à des valeurs d'hygrométrie constante.

Limite de saturation de l'air $H_r = 100\%$

L'air contient toujours une petite proportion de vapeur d'eau, mais celle-ci est limitée. Lorsque l'humidité relative atteint 100 %, l'air est totalement saturé d'eau – c'est la saturation de l'air limite, représentée sur le schéma par la première courbe supérieure.

1. Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
2. Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.
3. Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
4. Polygone de confort hygrothermique.

Pour un confort optimal et pour une température de l'air aux environs de 22°C, l'humidité relative optimale doit varier entre 40 et 65 % (Energie+, 2007).

1.3.1.2 Indicateurs et plages de confort

Le corps humain possède un mécanisme de régulation qui adapte ses pertes de chaleur aux conditions thermiques de l'ambiance. Ce mécanisme d'autorégulation laisse apparaître une zone dite de confort thermique. La zone de confort thermique est une plage de confort où la variation de sensation de confort thermique est faible. Cette dernière se présente soit graphiquement sur des diagrammes psychométriques, soit via l'indice de vote moyen prévisible expliqué précédemment.

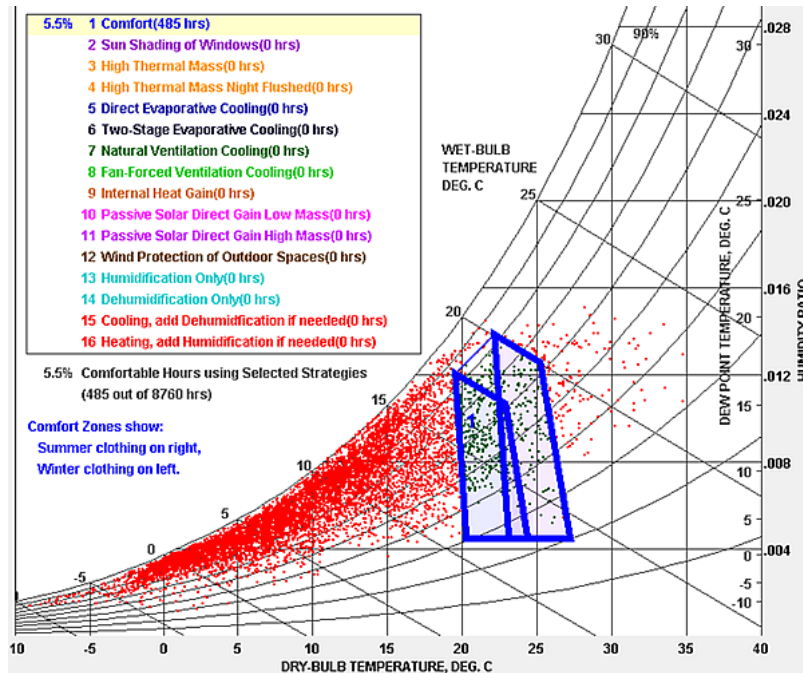


FIGURE 4: Plages de confort pour une activité de bureau et un habillement d'été ou d'hiver, selon l'ASHRAE Handbook of Fundamentals Comfort Model, 2005 superposées au climat de Bruxelles. (Energie+, 2007)

1.3.2 Le modèle de confort adaptatif

Les modèles adaptatifs quant à eux, tiennent compte de la capacité des personnes à s'adapter à des conditions environnementales variables dans des bâtiments climatisés naturellement en établissant une relation linéaire entre la température intérieure confortable et la température extérieure. Actuellement, il existe principalement deux normes relatives aux modèles adaptatifs : le modèle adaptatif qui dérive des études de ASHRAE 55 (ASHRAE Standard 55, 2013) et Brager (R. de Dear et al., 1997) et le modèle adaptatif EN 15251 basé sur le travail de Nicol et Humphreys (J. F. Nicol & Humphreys, 2002).

1.3.2.1. L'adaptation thermique : principe et mécanismes

“Si un changement arrive dans un environnement en provoquant un inconfort, les personnes répondront par des réactions qui tendent à rétablir le confort” (F. Nicol et al., 2012). L'ensemble de ces actions représente la base de l'adaptation.

Dans la théorie de l'approche adaptative, le confort thermique est défini comme étant un processus dynamique dans lequel l'occupant est un élément actif en interaction avec son environnement (il s'adapte aux variations climatologiques, saisonnières et quotidiennes de la température et tolère une gamme de températures beaucoup plus large que celles prescrites par le modèle de vote moyen prédit) afin de maintenir son confort. La différence par rapport à l'approche PMV-PPD est que l'occupant n'est plus un élément passif qui subit les conditions de l'ambiance thermique. On identifie trois catégories d'adaptation (comportementale, physiologique et psychologique).

A. La boucle comportementale – ajustements

Afin de maintenir le confort thermique, l'individu ajuste son comportement. Ces ajustements comportementaux sont plus ou moins conscients et peuvent varier selon le climat et la culture particulière. Ils peuvent être classés en trois catégories selon leurs effets respectifs :

- L'ajustement personnel :
 - Modifier la production de chaleur corporelle interne (diminuer ou augmenter le niveau d'activité, prendre une boisson chaude ou froide)
 - Modifier les échanges de chaleur du corps avec l'environnement (modifier son niveau d'habillement, augmenter/réduire la surface d'échange en modifiant la posture)
- L'ajustement technologique ou environnemental :
 - Modifier les conditions de l'ambiance thermique (ouvrir ou fermer une fenêtre/store, ajuster le thermostat, allumer un ventilateur/climatiseur/chauffage d'appoint, etc.)
 - Changer d'environnement thermique (se déplacer vers une autre pièce, renforcer l'isolement thermique du local)
- Les ajustements culturels :
 - activités de planification (temps de pause, codes vestimentaires,..)

Le confort est assuré grâce à une série de plusieurs actions adaptatives singulières.

B. La boucle physiologique - acclimatation

L'acclimatation physiologique correspond à une baisse de réactions humaines concernant l'autorégulation de la température interne face à une exposition cumulée ou répétée.

C. La boucle psychologique – accoutumance et attentes

Les personnes s'habituent aux conditions rencontrées dans leurs environnements quotidiens. Elles ont une sensation chaude si l'environnement thermique est plus chaud que d'habitude et inversement. Cette adaptation par accoutumance dépend de l'expérience thermique passée et donc de la mémoire de chaque individu. Cela lui sert de références pour évaluer son environnement.

Même si les études in situ ont permis de mettre en évidence l'adaptation psychologique, peu de recherches ont visé à déterminer ses effets sur le confort thermique. Une étude a comparé les réponses des votes de confort dans différents contextes (type de bâtiment, climat ou saison) et s'est basée sur trois types de bâtiments : bâtiments climatisés, bâtiments à ventilation naturelle, et bâtiments à ventilation naturelle munis d'équipements supplémentaires pour contrôler l'ambiance thermique. Ces derniers bâtiments enregistrent le plus haut niveau de satisfaction. Par conséquent, on peut conclure que les hommes ont une grande tolérance par rapport aux différentes ambiances thermiques dès lors qu'ils peuvent contrôler les conditions d'ambiances. Par ailleurs, dans les bâtiments climatisés, les personnes ont des attentes élevées quant à la qualité de l'ambiance thermique. C'est pourquoi le moindre changement sera possiblement considéré comme un risque s'ils n'ont aucun moyen de contrôle.

1.3.2.2. L'opportunité adaptative - contraintes et restrictions

L'acceptabilité thermique d'une ambiance est extrêmement dépendante de la possibilité de mise en œuvre des mécanismes adaptatifs. Cependant, certaines circonstances sont susceptibles d'entraver les mécanismes comportementaux en imposant des restrictions.

- Caractéristiques générales du bâtiment et du local en particulier (fenêtres inopérables ou bloquées, organisation spatiale et aménagement : bureau cloisonné, positions par rapport à la fenêtre et autres facilités), du mode de fonctionnement des équipements de contrôle de l'ambiance (contrôles centralisés ou individuels) ainsi que de l'organisation sociale dans le bâtiment (code vestimentaire).
- Contraintes relatives à la conception architecturale et technique (positionnement et taille des fenêtres, la présence des stores fixes ou amovibles, contrôle de la climatisation central ou local, bureaux qui limitent le degré de contrôle des personnes, etc.).
- Le climat et la culture influencent le mode de vie des hommes selon leurs façons de s'habiller, la conception des bâtiments et le style de vie dans ceux-ci.
- L'aspect économique présente aussi une contrainte à travers les coûts importants concernant l'installation et le fonctionnement des équipements de contrôle de l'environnement thermique.
- Les conditions sociales et professionnelles imposent aussi des contraintes selon l'activité (code vestimentaire, travailler dans un endroit fixe).
- Enfin l'interaction sensorielle joue aussi un rôle considérable à travers la multidisciplinarité entre les différents confort (une fenêtre donnant sur une rue bruyante pénalise son ouverture).

“On utilise la notion d'opportunité adaptative pour représenter le degré de liberté de l'occupant quant à la possibilité de mettre en œuvre des mécanismes adaptatifs pour qu'il s'adapte et lui permette d'améliorer son confort” (F. Nicol et al., 2012). Ce concept offre l'avantage de rendre possible l'identification et la quantification des effets des mécanismes adaptatifs des individus dans leurs lieux de vie.

Ainsi l'occupant peut tolérer le changement et la variation de l'ambiance lorsqu'il a une opportunité adaptative élevée. Bien entendu, les capacités d'action de l'occupant dépendent des dispositifs techniques mais également des caractéristiques personnelles en termes d'activité, de métabolisme et de mouvements produits. Pour cela, il est important de distinguer les opportunités disponibles dans le local et celles perçues par l'occupant.

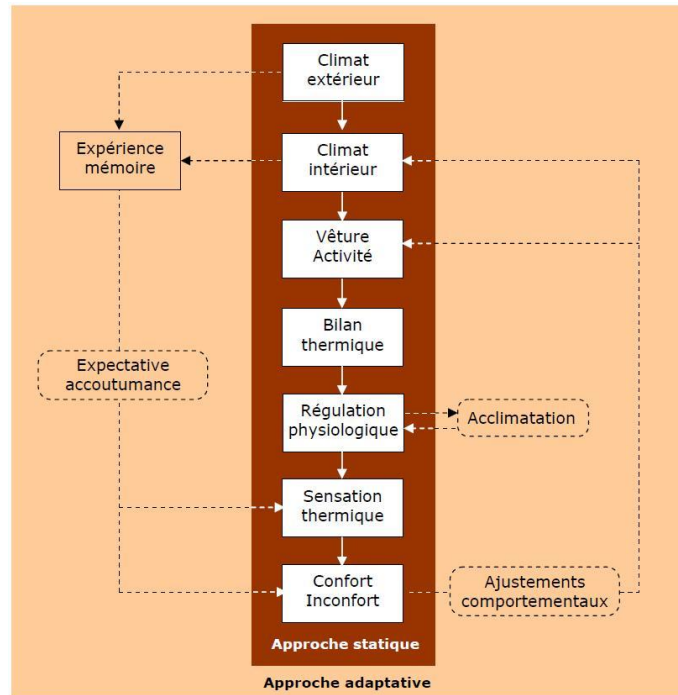


FIGURE 5: Représentation des mécanismes adaptatifs (R. J. de Dear et al., 2013)

2. Au delà du modèle PMV et adaptatif

Malgré leur adoption réussie dans les normes internationales, les deux types de modèles (PMV et adaptatif) présentent plusieurs limitations lorsqu'ils sont appliqués à la gestion du confort dans les bâtiments.

2.1. Variables d'entrée très spécifiques, coûteuses et difficiles à obtenir

Premièrement, une mise en œuvre complète du modèle PMV nécessite des variables d'entrée très spécifiques qui sont coûteuses et difficiles à obtenir dans les bâtiments. Deux des variables environnementales, la température radiante moyenne et la vitesse de l'air, ne sont généralement pas surveillées dans les bâtiments existants et nécessitent des instruments coûteux pour être mesurées avec précision. Deux variables personnelles, l'isolation des vêtements et les taux métaboliques, sont impossibles à collecter de manière automatisée, et leurs valeurs sont souvent supposées ou simplifiées, ce qui nuit à la précision prédictive du modèle (d'Ambrosio Alfano et al., 2011).

2.2. Performances prédictives moyenne

Deuxièmement, même si toutes les variables d'entrée sont obtenues avec précision, les deux modèles existants présentent des performances prédictives limitées lorsqu'ils sont appliqués aux individualités (van Hoof, 2008). Ceci est dû au fait que les modèles sont des modèles conçus pour prédire le confort moyen de grandes populations ; par conséquent, leur précision diminue lorsqu'il s'agit de prédire les réponses de confort thermique des individus en raison des grandes variations de confort thermique entre les personnes.

2.2.1. L'indice PPD

L'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) prédit quantitativement le pourcentage de personnes insatisfaites, car elles trouveraient l'ambiance thermique trop chaude ou trop froide et qui voteraient dès lors -3, -2, +2, +3 sur l'échelle PMV.

Grâce au PMV, nous pouvons prédire la sensation thermique d'une population, mais cela ne donne pas une vue d'ensemble. Il convient également tenir compte du niveau de satisfaction des occupants d'un espace, afin d'avoir une idée plus globale de la possibilité et de la manière d'atteindre le confort thermique. A cette fin, Fanger a développé une autre équation qui tend à mettre en contraste le PMV au pourcentage prédit de mécontents (PPD) (Fanger, 1973).

Afin de se conformer à la norme ASHRAE 55 (*ASHRAE Standard 55*, 2013), la limite thermique recommandée sur l'échelle à 7 points de PMV se situe entre -0,5 et 0,5. La norme ISO 7730 (*ISO 7730:2005*, n.d.) repousse cette limite, en donnant différentes fourchettes d'environnements intérieurs. L'ISO définit la limite dure comme étant comprise entre -2 et +2, pour les bâtiments existants entre -0,7 et +0,7, et pour les nouveaux bâtiments entre -0,5 et +0,5.

Le PPD varie de 5% à 100%, en fonction de la PMV calculée. Ces valeurs de confort varient en fonction de l'emplacement de l'occupant dans le bâtiment. Pour que les plages de confort soient conformes aux normes, aucun point occupé de l'espace ne doit être supérieur à 20 % de PPD.

La graphique ci-dessous illustre la correspondance entre les indices PMV et PPD :

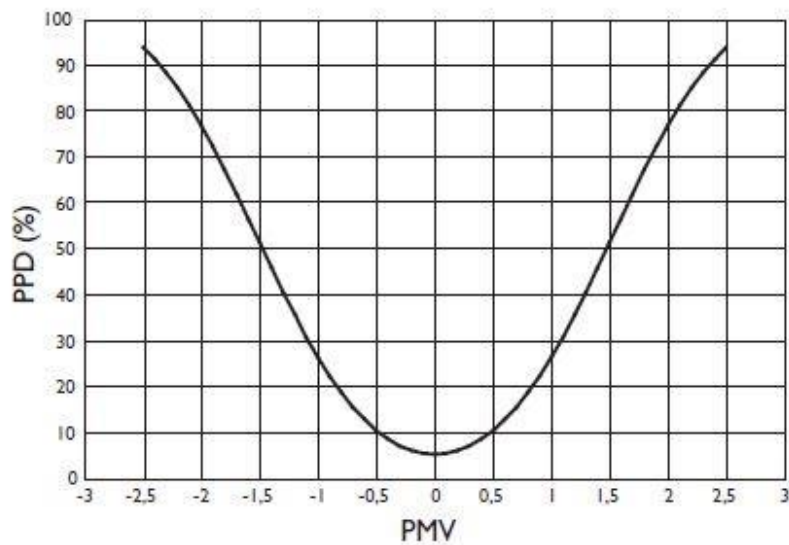


FIGURE 6: Indice PMV – PPD de confort thermique (Fanger, 1973)

On remarque que dans la situation de neutralité ($PMV = 0$, ni chaud ni froid), le taux de sujets insatisfaits expérimentant les mêmes conditions thermiques est de 5%. Ce taux augmente de la même manière si le PMV s'écarte de 0 vers le froid ou vers le chaud.

La zone de confort théorique peut être définie par le modèle PMV, le confort de l'individu sera également affecté par d'autres facteurs personnels tels que la santé, l'âge ou l'état mental. De plus, la "chaleur" humaine environnante influence également les sentiments de confort ou d'inconfort. Cela représente donc des modulateurs importants de la perception thermique mais ne sont pas pris en compte dans les modèles de confort traditionnels car ceux-ci se basent sur une "moyenne" (Predicted Mean Vote).

2.3. Manque de contexte aux données recueillies

Troisièmement, les deux modèles ne s'adaptent pas et ne réapprennent pas. Ils sont basés sur un ensemble fixe de données recueillies soit en laboratoire (PMV), soit sur le terrain (adaptatif). Par conséquent, les propriétés et les coefficients du modèle peuvent ne pas décrire avec précision les caractéristiques de confort des occupants individuels dans un contexte de terrain particulier.

Malheureusement, aucune disposition ne permet de mettre à jour l'un ou l'autre de ces modèles existants en fonction des réactions des occupants et des données recueillies sur le terrain dans de nouvelles circonstances. Par conséquent, ils ne peuvent pas être calibrés pour mieux correspondre aux attentes exprimées dans un contexte particulier. Ils ne permettent pas non plus de modifier leur ensemble respectif de variables d'entrée. Seules les variables prédéfinies sont introduites dans les modèles, sans tenir compte de l'existence d'autres facteurs susceptibles d'affecter le résultat réel. De nouvelles variables (par exemple, le sexe, l'indice de masse corporelle, l'heure de la journée, l'âge, l'état de santé, etc.) qui peuvent potentiellement être pertinentes pour le confort thermique des occupants dans un contexte particulier ne peuvent pas être incorporées dans le modèle, réduisant ainsi le potentiel d'amélioration de la précision prédictive et de notre compréhension des impacts contextuels sur le confort thermique humain.

3. Environnement thermique dynamique

Actuellement, les températures intérieures de conception recommandées sont basées sur des normes telles que ASHRAE 55 (ASHRAE Standard 55, 2013) et EN-ISO 7730 (ISO 7730:2005, n.d.) (section 1.3.). L'application de ces directives dans la pratique aboutit à des bâtiments conçus pour une population homogène aux préférences comparables. Cette homogénéisation thermique progressive au fil des ans a été attribuée à l'utilisation du chauffage central et de la climatisation. En outre, il a été postulé qu'au cours des 40 dernières années, les critères de confort thermique généralement utilisés, basés sur le modèle PMV (Fanger, 1970), ont abouti à des températures de l'air intérieur uniformes, avec des variations minimales en fonction de l'heure de la journée ou de la saison (Kobayashi & Tanabe, 2013). Progressivement, les températures deviennent de plus en plus homogènes et on observe une tendance à la hausse du réglage des températures intérieures en hiver. La tendance à des températures plus élevées en hiver et plus basses en été, combinée aux avantages pour la santé décrits ci-dessus des températures en dehors de la zone de confort thermique, peut donc avoir des effets significatifs sur notre santé métabolique (W. D. van Marken Lichtenbelt et al., 2018). Elle montre également que cette tendance peut potentiellement être inversée afin de promouvoir la santé métabolique.

Les effets de la température environnementale sur la santé humaine sont difficiles à étudier, car les changements dans l'état de santé évoluent lentement et peuvent également avoir une causalité indirecte avec la température. De plus, d'autres paramètres environnementaux, comme les conditions de lumière (te Kulve et al., 2015), peuvent avoir un effet confondant, ce qui rend encore plus difficile l'analyse de l'impact isolé de la température. Néanmoins, les maladies liées au syndrome métabolique semblent être liées à une température environnementale constamment confortable. Le syndrome métabolique est l'une des conditions de santé défavorables les plus répandues dans le monde et se caractérise par l'obésité, les maladies cardiovasculaires, le diabète et même certaines formes de cancer (W. D. van Marken Lichtenbelt et al., 2018).

En revanche, il a été démontré qu'un froid léger peut augmenter le métabolisme énergétique humain et que le froid comme la chaleur influencent d'autres facteurs liés à la santé métabolique (W. van Marken Lichtenbelt et al., 2017).

D'autres études ont été menées concernant les effets de la variabilité sur nos performances cognitives. Par exemple, une étude a exposé des sujets à des températures constantes et d'autres à des températures variables avec des valeurs moyennes similaires, et a constaté que les températures variables de façon dynamique réduisaient les symptômes de somnolence et les difficultés de concentration (Miura & Ikaga, 2016).

Les températures de l'air typiques maximales pour activer la thermogénèse sans frisson sont d'environ 14-16°C pour des adultes maigres et légèrement vêtus. Cependant, une autre étude indique que l'exposition à 19°C, ressentie comme une température douce et froide, entraîne déjà une augmentation prévisible des dépenses énergétiques ((Celi et al., 2010).

Il est important de noter que les excursions temporelles prolongées en dehors de la zone de confort thermique entraînent une acclimatation qui se traduit par une augmentation des indices de confort. Deuxièmement, les températures basses ou élevées dans un environnement thermique dynamique peuvent être perçues comme acceptables, voire agréables (évoquant une alliesthésie thermique) (W. van Marken Lichtenbelt et al., 2017).

3.1. Normes de construction et les systèmes de certification

Comme l'absence de mal-être n'entraîne pas nécessairement le bien-être, des études récentes se sont efforcées de proposer des stimuli positifs. Ceux-ci provoquent des sensations ou des réponses de bien-être. Cette évolution commence également à se manifester dans les normes de construction et les systèmes de certification.

Par exemple, les certifications LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) et BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) ont récemment étendu l'évaluation des impacts directs et indirects des bâtiments au-delà de la qualité de l'environnement intérieur.

LEED se base sur l'amélioration du bien-être pour "promouvoir la santé des [...] occupants et utilisateurs des bâtiments, de la communauté environnante ou de la chaîne d'approvisionnement" (LEED Rating System, n.d.).

De même, la norme BREEAM inclut la prise en compte du bien-être social et économique, des transports et des déplacements, de la sûreté et de la sécurité est inclus dans la norme BREEAM (BREEAM, 2022).

La norme WELL se distingue des normes BREEAM et LEED par l'importance qu'elle accorde à la santé et au bien-être, et ce, dans dix domaines : l'air, l'eau, l'alimentation, la lumière, l'activité physique, le confort thermique, le bruit, les matériaux, l'esprit et la société (Normes de Construction WELL, BREEAM et LEED, n.d.). Cette norme permet aux gestionnaires d'appliquer certaines règles en matière de conception et fonctionnement des environnements bâtis.

4. Modèles de confort personnel

Pour surmonter les inconvénients énumérés ci-dessus, le monde universitaire et l'industrie ont cherché des moyens d'améliorer la pertinence pratique des modèles de confort thermique pour l'exploitation des bâtiments. Avec l'émergence de l'Internet des objets qui nous permet de générer des données personnelles très granulaires, des efforts ont été entrepris pour analyser ces données afin de prédire le confort thermique des individus. Ce nouveau domaine de recherche est appelé modèles de confort personnel (Kim et al., 2018).

Cette nouvelle approche de modélisation peut changer fondamentalement la gestion du confort générique et "taille unique" d'aujourd'hui en rendant disponibles des prédictions de confort spécifiques à l'individu et au contexte pour un contrôle environnemental centré sur l'occupant. Les possibilités associées aux modèles de confort personnel ont suscité un intérêt considérable au sein des communautés de la recherche et de l'industrie.

Un modèle de confort personnel prédit la réponse du confort thermique d'un individu, au lieu de la réponse moyenne d'une large population. Ces modèles peuvent être utilisés pour mieux comprendre les besoins et les souhaits spécifiques des occupants individuels en matière de confort et pour caractériser un ensemble de conditions susceptibles de satisfaire leur confort thermique dans un espace donné afin de fournir un conditionnement optimal pour une meilleure satisfaction du confort et une meilleure efficacité énergétique (C. Talon, N. Goldstein, 2015). Ces qualités sont en accord avec la tendance actuelle de la gestion intelligente du confort.

La plupart des bureaux typiques sont munis de systèmes HVAC (heating, ventilation and air-conditioning). Or, ceux-ci consomment une grande partie de la demande énergétique mondiale (près de 20% de la consommation totale d'énergie dans les pays développés, et cette proportion augmente partout). Une grande partie de cette énergie est utilisée pour maintenir des plages de température intérieure étroites (généralement de 2°C à 4 °C) que les occupants de ces espaces considèrent comme nécessaires pour le confort (H. Zhang, Arens, & Zhai, 2015).

Si les limites de température acceptables sont plus grandes que les plages de points de consigne de température par défaut, on peut s'attendre à des économies d'énergie HVAC (c.-à-d., ventilateurs, chauffage) en élargissant les points de consigne de température (Ghahramani et al., 2016).

5. Systèmes de confort personnel (PCS)

Les systèmes de chauffage central (comme les systèmes HVAC) sont désavantagés lorsqu'il s'agit de susciter le confort thermique en raison de leurs lents changements des températures de fonctionnement.

En comparaison, les modes de transfert de chaleur focalisés des systèmes de confort personnel (PCS) peuvent modifier rapidement la perception thermique en raison de leur capacité à cibler les stimuli correctifs sur des sites corporels particuliers dans des environnements intérieurs modérés (Godithi et al., 2018).

La littérature mentionnée établit que les PCS, sont en général un moyen efficace d'atteindre des conditions de confort au niveau personnel. Les PCS offrent également aux occupants le plaisir psychologique de pouvoir modérer eux-mêmes leur ambiance thermique immédiate. La combinaison de ces avantages se traduit par une augmentation de la productivité et de la satisfaction des occupants sur le lieu de travail (Song et al., 2022).

Les PCS ont la capacité de satisfaire les besoins de confort individuels différents selon l'âge, le sexe, la masse corporelle, les habitudes vestimentaires, l'adaptation thermique et le taux métabolique (Zhang, Arens, & Zhai, 2015).

5.1. Les PCS pour les différences de préférences thermiques entre les occupants des espaces partagés

Avec les modèles de confort personnel, ces différences sont révélées et quantifiées afin qu'elles puissent être traitées. Les études existantes ont exploré deux approches concernant cette question.

A. Les solutions consensuelles (accord entre personnes)

En ce qui concerne les solutions consensuelles, Jazizadeh et al (Jazizadeh et al., 2014) ont sélectionné un point de consigne de température qui minimise l'erreur entre les températures ambiantes préférées et réelles de chacun.

Dans le cas où des niveaux de confort acceptables ne pourraient pas être atteints pour tous les occupants d'une zone, ils ont augmenté progressivement la plage de température acceptable des individus dans un seuil d'inconfort prédéfini pour ensuite déterminer la consigne de température à la majorité des voix. Bien que ces stratégies nécessitent un système pour ajuster en fin de compte le point de consigne, la prise de décision sous-jacente était basée sur le consensus.

B. Les solutions technologiques

Pour les solutions technologiques, des chercheurs (Erickson & Cerpa, 2012) ont par exemple rendu possible des ajustements de consigne de thermostat en temps réel en fonction des demandes des occupants afin de résoudre les problèmes de confort dans les espaces partagés au fur et à mesure qu'ils surviennent. Un autre exemple de solution technologique utilisait des systèmes de confort personnel (PCS) pour fournir un chauffage et un refroidissement local sans affecter les autres dans le même espace (H. Zhang, Arens, & Zhai, 2015). Avec un PCS, les individus peuvent répondre à leurs propres besoins ou désirs de confort dans des espaces partagés, et donc être moins vulnérables aux conditions thermiques définies par les systèmes centralisés.

5.2. Les PCS pour les différences de genres

Les femmes ont tendance à ressentir une sensation plus fraîche que les hommes dans les environnements frais/froids, mais peu de différences entre les sexes ont été trouvées dans les réponses de confort thermique aux environnements neutres et légèrement chauds. Selon Karjalainen (Karjalainen, 2007), les femmes sont moins satisfaites des températures intérieures des pièces que les occupants masculins car elles préfèrent des températures plus élevées que les hommes. De même, les femmes sont plus souvent confrontées à des conditions de froid et de chaleur inconfortables que les hommes, mais règlent moins souvent les thermostats que les hommes. Compte tenu des preuves présentées ci-dessus, l'utilisation des PCS peut résoudre les différentes demandes thermiques induites par la différence entre les sexes. Par conséquent, l'amélioration du confort des employés de bureau, hommes et femmes, grâce à l'utilisation de PCS personnalisés peut améliorer la productivité de certaines de leurs tâches.

Apport des PCS à un environnement ventilé uniforme

De tels systèmes de confort personnel peuvent être extrêmement efficaces sur le plan énergétique (H. Zhang et al., 2010) tout en offrant des niveaux élevés de confort et de satisfaction thermique dans une vaste gamme de conditions ambiantes (Jin et al., 2011)(Zhai et al., 2013).

De manière scientifique, les PCS sont efficaces de par leur fonctionnement pouvant être relié au phénomène d'alliesthésie.

6. Alliesthésie

L'alliesthésie fait référence à la réponse de plaisir (ou agréabilité) qui accompagne la correction des déséquilibres thermiques entre les différents sites du corps (Parkinson & de Dear, 2014)(Parkinson et al., 2015). Elle est généralement divisée en deux types distincts :

6.1. L'alliesthésie temporelle

L'alliesthésie temporelle est le plaisir résultant des changements de la température de la peau et/ou du cœur du corps entier qui corrigent un déséquilibre thermique global (Chatonnet & Cabanac, 1965).

Un changement rapide du plaisir se produit lorsque les sujets passent d'une condition à une autre. Un pic de plaisir apparaît lorsque les sujets passent d'un état froid/chaud à la neutralité, tandis qu'une baisse soudaine de la sensation agréable advient lors de la transition de la neutralité à la non-neutralité. Néanmoins, l'alliesthésie temporelle est quelque peu limitée parce qu'un dépassement du plaisir thermique est de courte durée au début des stimuli thermiques.

6.2. L'alliesthésie spatiale

L'alliesthésie spatiale se produit lorsque des stimuli locaux s'opposent à l'état thermique du reste du corps, par exemple en réchauffant certains sites sur une surface corporelle par ailleurs froide (H. Zhang, Arens, Huizenga, et al., 2010)(Arens et al., 2006). Le plaisir thermique dans ces deux types est motivé par la réponse accrue du système thermosensoriel au taux de la température de la peau par rapport à la température absolue (Parkinson & de Dear, 2014).

Pour l'alliesthésie spatiale, certaines combinaisons de sensations thermiques provenant de parties du corps non neutres peuvent produire une sensation plus agréable que celle de la neutralité uniforme du corps entier (Arens et al., 2006).

Il a été montré qu'un changement de la température de la peau apporte une sensation de plaisir ou d'inconfort sans entraîner de changement de température interne (Parkinson & de Dear, 2014).

A l'inverse, des conditions thermiques uniformes et constantes tout au long de la journée et de l'année, ne satisferaient pas nos besoins (van Marken Lichtenbelt et al., 2018).

Il est clair qu'un environnement thermique dynamique suscite cet alliesthésie de part ces conditions variables. L'expérience présentée dans la troisième partie de ce travail de recherche consiste donc à évaluer le confort des volontaires en leur offrant un environnement thermique dynamique et des systèmes de confort personnel.

Troisième partie: Expérimentation

1. Question de recherche, contexte et hypothèse

Question de recherche

Dans un contexte de développement durable, à quel point les dispositifs personnels de confort peuvent-ils agir sur le confort des sujets travaillant dans un espace de bureau partagé ?

Contexte

L'exposition à un environnement dynamique pour optimiser le bien-être des occupants (alliesthésie)

Hypothèse

L'intégration de systèmes de confort personnels pour améliorer le confort thermique des occupants, élargir la plage de températures ambiantes intérieures acceptable

2. Dispositions de l'expérience

L'objectif de l'expérimentation faisant l'objet de mon TFE est de vérifier, sur base d'analyse d'un cas concret et de manière simple, que l'utilisation de PCS dans un environnement dynamique peut élargir la plage de température acceptable tout en préservant le confort thermique des occupants.

L'expérience de ce mémoire consiste à déterminer si, dans un environnement dynamique, les systèmes de confort personnel peuvent élargir la plage de température acceptable et garantir la perception du confort dans un espace de bureau partagé. Pour cela, les occupants peuvent agir sur le choix de leurs vêtements, l'ouverture de la fenêtre, l'ouverture de la porte. Ils sont également libres d'utiliser les PCS mis à leur disposition (couvertures chauffantes, câbles chauffants, panneaux infrarouges, panneaux radiants,..).

Brève explication de la mise en œuvre de l'expérience

L'expérimentation consiste à créer un environnement dynamique dans un local et d'observer les actions des occupants de ce dernier. Pour cela, on va déconnecter le chauffage central du local et chauffer ce dernier à l'aide de radiateurs électriques programmés de 8h à 10h du matin afin d'atteindre 20 degrés (température considérée comme acceptable). Ensuite après 10h, le local est libre de varier en température ce qui permet donc de créer un environnement dynamique. Les différents PCS sont mis à disposition des membres de l'expérience. Les participants peuvent les utiliser à souhait afin de rétablir leur confort thermique si besoin. Par la suite, on relèvera le ressenti du point de vue du confort thermique de chacun ainsi que leurs actions (utilisation des PCS, ajustement vestimentaire, boire une boisson chaude, ouvrir ou fermer les fenêtres) à l'aide d'un logbook (FIGURE 16). Sur cette base, complétée par les enregistrements en continu de la centrale d'acquisition TESTO 480, l'analyse vise à répondre à la question de recherche.

3. Justification des différents PCS

Les couvertures chauffantes, fils chauffants, panneaux de 300 WATTS, panneaux radiants de 1200 WATTS constituent un bon moyen d'obtenir des premiers résultats de confort tout en limitant les investissements. Aisément disponibles dans le commerce, leur principe d'action est facilement mis en place.

4. Cadre de la recherche, étapes spécifiques

4.1. Sélectionner quels types, combien et/ou quelles combinaisons de PCS tester lors de l'étude

Matériel requis

- Une centrale d'acquisition TESTO 480. Cet appareil permet d'enregistrer, analyser et documenter tous les paramètres pertinents en matière de climat et de qualité de l'air intérieur. Il se caractérise grâce à sa précision et à sa facilité d'utilisation. Les mesures concernant la qualité de l'environnement intérieur sont déterminées grâce à trois différentes sondes. Celles-ci permettent de récolter les données suivantes: la vitesse de l'air, la température, l'humidité relative, la pression (pression différentielle et pression absolue) et la concentration en CO2.

Les résultats de cet appareil de mesure peuvent être transférés directement sur PC au moyen d'un câble USB, puis affichés, évalués et documentés très aisément grâce au logiciel « EasyClimate » fourni.



FIGURE 1: Centrale d'acquisition TESTO 480

- Deux contrôleurs de température et deux timers. Ces deux appareils vont nous permettre de mettre en marche les radiateurs électriques selon les critères voulu.



FIGURE 2: Contrôleur de température et timer

- Deux radiateurs électriques qui vont nous permettre de chauffer le local de 8h à 10h du matin



FIGURE 3: Radiateur électrique

- Une couverture électrique chauffante munie d'une commande de puissance à six niveaux. Leur puissance maximale est de 100 W.



FIGURE 4: Couverture électrique

- Un câble chauffant, source de chaleur par conduction



FIGURE 5: Câble chauffant

- Trois panneaux infrarouges de 300 WATTS. Ces panneaux sont des procédés de chauffage avec rayonnement infrarouge. Ces derniers possèdent un système d'accrochage intégré permettant de monter l'appareil au mur, sur pieds ou au sol grâce aux supports disponibles séparément.



FIGURE 6: Panneau infrarouge

- 1 panneau radiant de 1200 WATTS. Il s'agit d'un radiateur à fonction rotative pour une répartition uniforme de l'air et protection anti basculement. Celui-ci possède trois allures de chauffe : 400/800/1200 W



FIGURE 7: Panneau radiant

4.2. Constituer un échantillon de volontaires

Pour les besoins de l'expérience, il a fallu trouver un groupe de volontaires respectant certains critères (FIGURE 8). Parmi ces volontaires, il devait y avoir des hommes et des femmes ayant un même rythme de travail, se trouvant dans un seul local pour faciliter le contrôle de l'environnement et la collecte des données. Certains chercheurs de la cellule architecture et climat remplissent ces conditions. En effet, il s'agit de deux hommes et deux femmes travaillant dans le même espace de travail partagé.

Ces chercheurs se trouvent dans la tranche d'âge des 25 - 40 ans et travaillent depuis minimum 3 mois dans le lieu qu'ils occupent.

De plus, ces occupants sont d'origines différentes, ce qui permet possiblement d'observer des différences d'acclimatation (de par leur habitudes culturelles et physiologiques) à un nouvel environnement.

Place	Genre	Origine	Age	Ancienneté dans le bâtiment	Heures/semaine dans le local
A	Femme	Turc	39	8 mois	>30
B	Femme	Chilien	25-40	1 an	>30
C	Homme	Iranien	27	1 an	<10
D	Homme	Indien	25-40	8 mois	11 to 30

FIGURE 8: Tableau reprenant les informations personnelles des volontaires

Ce local A017 se trouve dans le bâtiment Vinci de l'Université Catholique de Louvain à Louvain-La-Neuve. Il se fait que ce dernier est un bâtiment à cour et le local, utilisé pour l'expérimentation de ce TFE, se trouve au Nord Ouest de cette cour avec l'ouverture vers l'extérieur côté Sud (FIGURE 9).

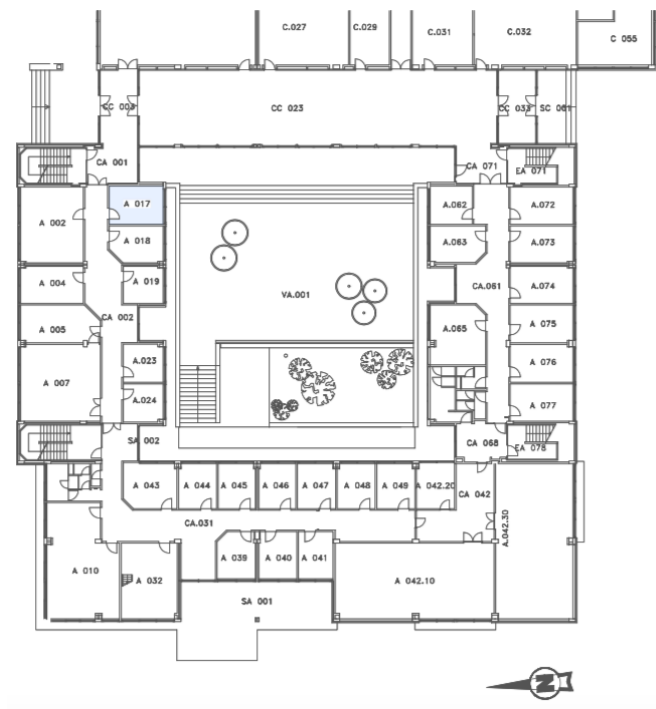


FIGURE 9: Plan du rez-de-chaussée du bâtiment Vinci

Le local (A017) (FIGURE 10) comporte 4 postes de travail, occupés par des personnes prestant une activité de type «bureautique» en horaire de jour, hors WE.

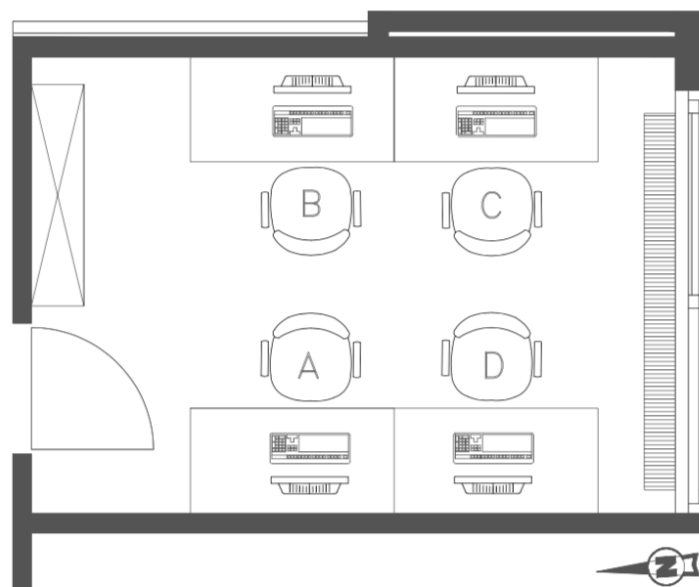


FIGURE 10: Plan du local de l'expérience (A017)

4.3. Soumettre les volontaires à un environnement dynamique en leur donnant la possibilité de réajuster leur bien-être grâce aux PCS

En temps normal, le chauffage du bâtiment Vinci se fait par des radiateurs hydrauliques alimentés par le chauffage urbain, lequel est fourni en chaleur par une co-génération gaz. Le chauffage centralisé du local est réglé sur 20 °C. On peut observer que la porte donnant vers le couloir est régulièrement ouverte durant les heures d'occupation de manière à aérer le local.

Pour les besoins de l'expérience nécessitant de soumettre les volontaires à un environnement dynamique, les radiateurs hydrauliques sont éteints durant toute la période étudiée et le chauffage est assuré par deux radiateurs électriques programmés.

Mise en place du matériel

Les radiateurs électriques sont branchés en série sur un timer et une prise thermostatique électrique. Ceux-ci reçoivent la consigne d'élever la température du local à vingt degrés de 8h à 10h du matin. Ensuite, la température est libre de varier car les radiateurs électriques sont éteints.

La centrale d'acquisition TESTO 480 est placée au centre de la pièce afin de récolter les valeurs moyennes de températures, le niveau d'humidité de l'air ainsi que la vitesse de l'air. Il est pris comme hypothèse que la température de l'air est uniforme dans la pièce et est donnée par la centrale. La température des parois est considérée comme équivalente à la température de l'air de la pièce.



FIGURE 11: Mise en place du matériel de l'appareil TESTO 480

4.4. Collecter les données et vérifier les hypothèses

1. Environnement dynamique

Le local est soumis à un environnement thermique dynamique grâce aux réglages des radiateurs électriques et les PCS sont mis à disposition des occupants du local. Premièrement, il a fallu vérifier que le système mis en place avec les radiateurs électriques et les prises thermostatiques permet bien de créer un environnement thermique dynamique.

La tendance concernant la température extérieure est fournie quotidiennement par le site [CLIMATE-DATA.ORG](https://climate-data.org) (Météo Pour Louvain-La-Neuve En Février 202: Températures et Table Climatique - Climate-Data.Org2, n.d.).

Grâce à la centrale d'acquisition TESTO 480, dont la fréquence d'enregistrement des données est programmée toutes les cinq minutes, nous avons pu extraire un graphe représentant le caractère dynamique de la température ambiante dans le local A017 du bâtiment Vinci.

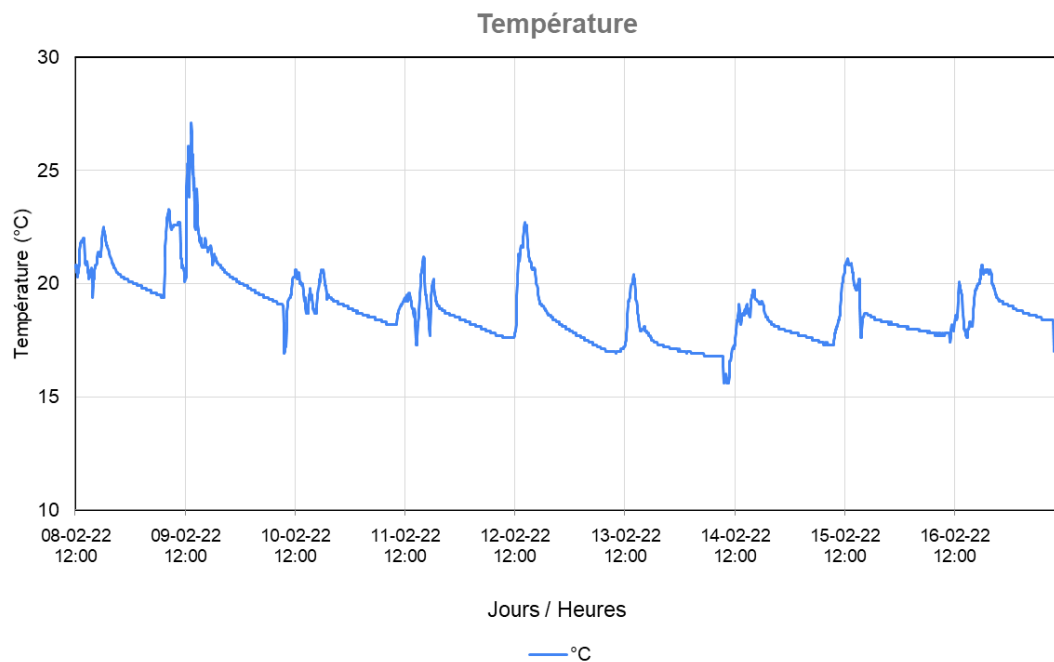


FIGURE 12: Températures collectées dans le local A017 pour la période du 8-02 au 17-02 2022

Ce graphe (FIGURE 12) représente l'environnement dynamique souhaité dans le local où se passe l'expérience. On observe que la température intérieure augmente et atteint un pic en fin de matinée. Ensuite, la température du local varie et baisse en température. On remarque que les pics de température observés sur ce graphe dépassent la température souhaitée avec les radiateurs électriques. Cela s'explique par l'effet du soleil au travers des vitrages. En effet, l'énergie solaire transmise au local par l'intermédiaire des vitrages est absorbée par les objets et les parois intérieures qui, en s'échauffant, peut entraîner la surchauffe de l'air par l'effet de serre. Cependant, on observe le 8-02 et le 9-02 des températures intérieures plus élevées que la moyenne de la semaine.

Deux hypothèses peuvent expliquer ce phénomène, notamment l'inertie thermique du local, les heures d'ensoleillement/jour et la présence des occupants et d'équipement (ex. ordinateurs) (les charges internes du local).

L'inertie thermique d'un bâtiment caractérise sa capacité à accumuler ou à restituer rapidement la chaleur ou la fraîcheur vers un local. Plus l'inertie est importante, moins vite la pièce se réchauffera ou se refroidira.

C'est donc un élément probable car le local est chauffé grâce au chauffage central jusqu'au 7-02. En ce qui concerne les données climatiques pour le mois de février 2022, celles-ci se retrouvent dans le tableau ci-dessous (FIGURE 14). Il nous montre en effet les heures d'ensoleillement/jour. Durant la journée du 7-02 il y a eu 4,5 heures de soleil. Cette exposition en plus de l'inertie thermique du local peuvent expliquer ces pics de température plus élevées en début d'expérience.

	La température (°C)	La température max (°C)	La température min (°C)	Précipitations (mm)	Heures de soleil (h)
7. Février	3 °C	6 °C	1 °C	1.9 mm	4.5
8. Février	4 °C	6 °C	1 °C	2.5 mm	3.3
9. Février	3 °C	6 °C	-0 °C	2.0 mm	3.7
10. Février	3 °C	6 °C	0 °C	3.4 mm	3.9
11. Février	3 °C	6 °C	1 °C	3.2 mm	3.2
12. Février	3 °C	6 °C	-0 °C	3.6 mm	4.0
13. Février	2 °C	5 °C	-0 °C	2.3 mm	3.9
14. Février	3 °C	6 °C	-0 °C	2.0 mm	4.0
15. Février	3 °C	7 °C	0 °C	2.8 mm	4.8
16. Février	3 °C	7 °C	0 °C	1.1 mm	4.9
17. Février	3 °C	6 °C	0 °C	1.0 mm	4.4
18. Février	3 °C	7 °C	-0 °C	2.2 mm	3.9
19. Février	4 °C	7 °C	1 °C	1.7 mm	4.1

FIGURE 13: Table climatique pour Louvain-la-Neuve, Février 2022 - (*Météo Pour Louvain-La-Neuve En Février 202: Températures et Table Climatique - Climate-Data.Org2, n.d.*)

Le graphe ci-dessous (FIGURE 14) représente une journée dans la période évaluée de l'environnement thermique dynamique voulu dans le local. Les radiateurs électriques sont réglés de façon à chauffer le local de 8h à 10h du matin or la température augmente peu après 9h.

Cela s'explique par le fait que les occupants, dès leur arrivée sur le site, renouvellent l'air en ouvrant les fenêtres. Cela retarde donc le réchauffement du local. Ensuite, la température augmente de par l'occupation des lieux et de l'effet du soleil au travers des vitrages. On remarque par la suite un climat variable jusqu'à la fin de la journée.

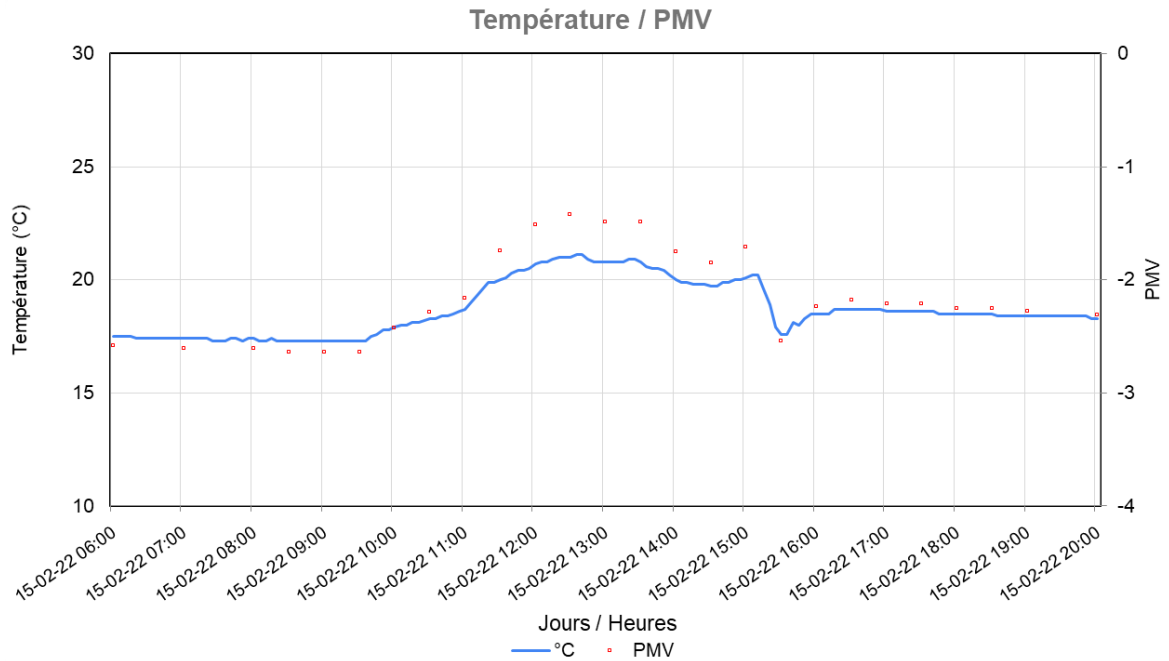


FIGURE 14: Températures collectées dans le local A017 pour la journée du 15-02

L'appareil TESTO 480 a également enregistré les valeurs d'humidité relative au sein du local A017 du bâtiment Vinci. Ces données nous sont utiles afin de pouvoir calculer l'indice PMV à l'intérieur du local (CBE confort tool).

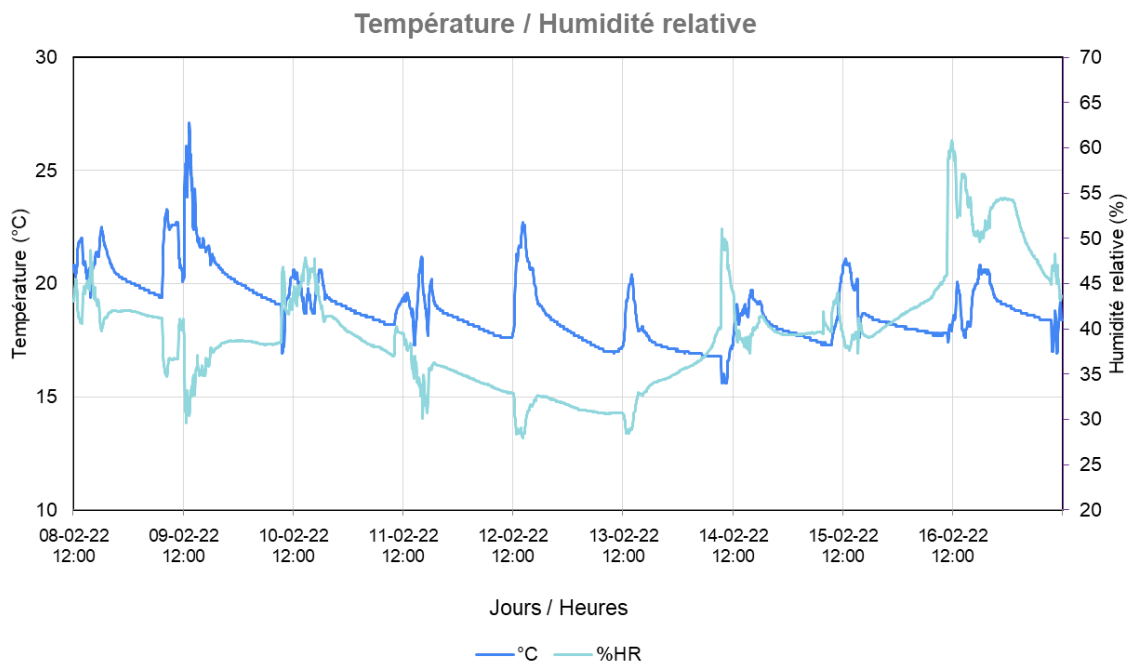


FIGURE 15: Valeurs de température et d'humidité relative collectées dans le local A017 pour la période du 8-02 au 17-02 2022

Nous déduisons de ce graphe reprenant la température intérieure du local ainsi que l'humidité relative (FIGURE 15) que plus la température intérieure est élevée plus le pourcentage d'humidité relative est bas. Le chauffage assèche l'air de façon dramatique en hiver. Il faut donc éviter de surchauffer les espaces intérieurs. Chaque degré de température en plus permet de gagner en humidité relative, et inversement avec chaque degré en moins (Lawrence, 2005).

2. Suivis et ressentis des volontaires

Afin de suivre et de récolter les actes et ressentis en termes de confort des volontaires, un logbook personnel a été distribué aux volontaires (FIGURE 16).

Please complete the information at the asking times

Time		Clothing Level (clo)	Thermal comfort	Actions to regular thermal comfort
Day	Hour			(changing in clothes level, using PCS, drinking cold or hot drinks, opening or closing windows,..)
Month	Min		-3 -2 -1 0 1 2 3	

FIGURE 16: Extrait du Logbook

Il est demandé aux volontaires de remplir ce logbook dès qu'ils ressentent un inconfort thermique et qu'ils effectuent une action permettant de rétablir ce dernier.

Ces actions peuvent être multiples comme par exemple changer son niveau d'habillement, jouer avec l'ouverture des fenêtres, ingérer une boisson chaude (ou froide), sortir faire un tour ou bien utiliser un/des PCS. Au moment de l'action, dans le logbook, il est demandé d'indiquer le jour et l'heure. Le niveau d'habillement (à l'aide d'un tableau reprenant l'indice "clo" de chaque vêtement pris séparément FIGURE 17) est également demandé ainsi que leur perception de confort thermique (voir échelle du "vote moyen prévisible" dans la section 1.3.1.)

	<u>clo</u>	<u>check</u>		<u>clo</u>	<u>check</u>
Underwear			Dress and Skirts		
Bra	0.01	<input type="checkbox"/>	Skirt (thin)	0.14	<input type="checkbox"/>
Panties	0.03	<input type="checkbox"/>	Skirt (thick)	0.23	<input type="checkbox"/>
Men's briefs	0.04	<input type="checkbox"/>	Sleeveless, scoop neck (thin)	0.23	<input type="checkbox"/>
T-shirt	0.08	<input type="checkbox"/>	Sleeveless, scoop neck (thick)	0.27	<input type="checkbox"/>
Half-slip	0.14	<input type="checkbox"/>	Short-sleeve shirtdress (thin)	0.29	<input type="checkbox"/>
Long underwear bottoms	0.15	<input type="checkbox"/>	Long-sleeve shirtdress (thin)	0.33	<input type="checkbox"/>
Long underwear top	0.20	<input type="checkbox"/>	Long-sleeve shirtdress (thick)	0.47	<input type="checkbox"/>
Footwear			Trousers and Coveralls		
Ankle-length athletic socks	0.02	<input type="checkbox"/>	Short shorts	0.06	<input type="checkbox"/>
Pantyhose/stockings	0.02	<input type="checkbox"/>	Walking shorts	0.08	<input type="checkbox"/>
Sandals/thongs	0.02	<input type="checkbox"/>	Straight trousers (thin)	0.15	<input type="checkbox"/>
Shoes	0.02	<input type="checkbox"/>	Straight trousers (thick)	0.24	<input type="checkbox"/>
Calf-length socks	0.03	<input type="checkbox"/>	Sweatpants	0.28	<input type="checkbox"/>
Knee socks (thick)	0.06	<input type="checkbox"/>	Overalls	0.30	<input type="checkbox"/>
Boots	0.10	<input type="checkbox"/>	Coveralls	0.49	<input type="checkbox"/>
Shirts and Blouses			Suit Jackets and Vests		
Sleeveless/scoop-neck blouse	0.12	<input type="checkbox"/>	Sleeveless vest (thin)	0.10	<input type="checkbox"/>
Short-sleeve knit sport shirt	0.17	<input type="checkbox"/>	Sleeveless vest (thick)	0.17	<input type="checkbox"/>
Short-sleeve dress shirt	0.19	<input type="checkbox"/>	Single-breasted (thin)	0.36	<input type="checkbox"/>
Long-sleeve dress shirt	0.25	<input type="checkbox"/>	Single-breasted (thick)	0.44	<input type="checkbox"/>
Long-sleeve flannel shirt	0.34	<input type="checkbox"/>	Double-breasted (thin)	0.42	<input type="checkbox"/>
Long-sleeve sweatshirt	0.34	<input type="checkbox"/>	Double-breasted (thick)	0.48	<input type="checkbox"/>
Sweaters					
Sleeveless vest (thin)	0.13	<input type="checkbox"/>	Clo value (sum of individual values) = _____		
Sleeveless vest (thick)	0.22	<input type="checkbox"/>			
Long-sleeve (thin)	0.25	<input type="checkbox"/>			
Long-sleeve (thick)	0.36	<input type="checkbox"/>			

FIGURE 17: Tableau reprenant l'indice "clo" de chaque vêtement pris séparément (Parkinson & de Dear, 2016)

5. Résultats

Les résultats individuels inscrits dans le logbook ont été comparés aux indices PMV calculés en fonction de l'environnement intérieur (température globale et humidité relative) réel du local. Ces indices sont calculés grâce à l'outil Thermal Comfort Tool du CBE (center for the built environment) (*CBE Thermal Comfort Tool*, n.d.). Voici les valeurs implémentées dans le logiciel CBE afin d'en extraire le PMV pour des conditions de bureau durant notre période de tests.

1. La vitesse de l'air = 0,01 m/s

2. Le taux métabolique = 1 travail de bureau

L'intensité d'une activité physique est le plus souvent exprimée en MET (équivalent métabolique ; metabolic equivalent of task). Ceci étant le rapport de la dépense énergétique liée à l'activité physique sur le métabolisme de base. 1 MET correspond au niveau de dépense énergétique au repos.

3. Le niveau d'habillement = 0,67 clo (pantalon, pull à longues manches)

L'unité d'isolement thermique du vêtement (Icl) utilisée est le "clo", de l'anglais "Clothing". Un clo est défini comme l'isolement vestimentaire nécessaire pour maintenir en équilibre le bilan thermique d'un sujet au repos, exposé à un air calme (0,1 m/s), une température de 21°C et une humidité relative de 50%. (Vêtements, 2015)

4. La température opérative donnée par l'outil de mesure TESTO 480

5. L'humidité relative donnée par l'outil de mesure TESTO 480

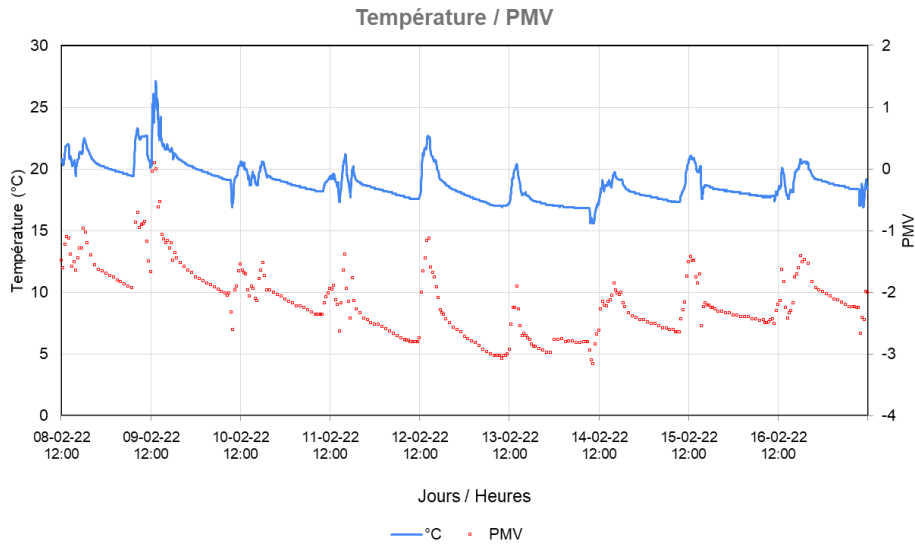


FIGURE 18: Valeurs de températures/PMV collectés dans le local A017 pour la période du 8-02 au 17-02 2022

Sur ce graphe (FIGURE 18), nous observons le PMV du local calculé grâce à l'implémentation des données de la centrale d'acquisition TESTO 480 dans l'outil de calcul de confort thermique CBE. Ce PMV est largement négatif et cela dû à la faible température intérieure et d'humidité relative du local.

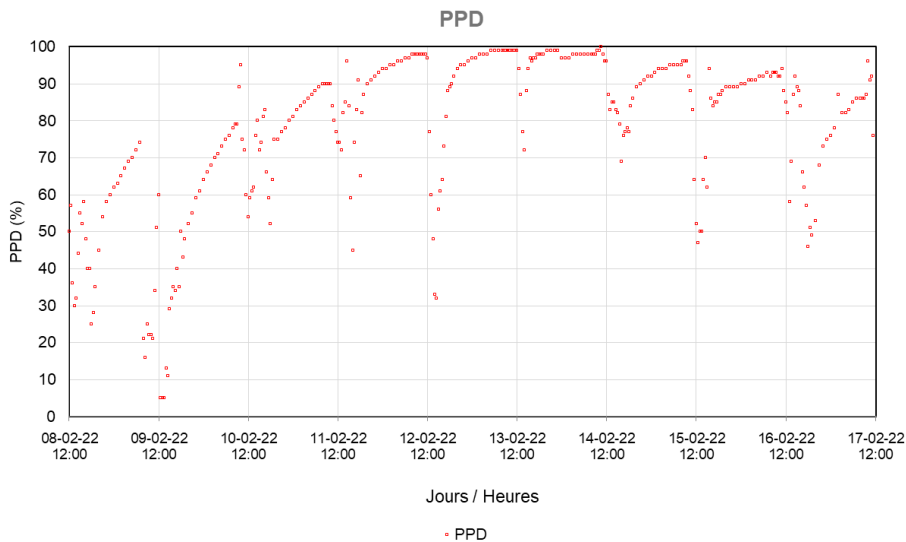


FIGURE 19: Valeurs de PPD collectés dans le local A017 pour la période du 8-02 au 17-02 2022

Comme le PPD est lié à l'indice PMV, on constate que le pourcentage d'insatisfaction réel dans le local est très élevé (FIGURE 19). Tout ceci représente la situation dans laquelle les volontaires se trouvent durant l'expérience. Ce contexte pousse l'utilisation des PCS afin d'élever le l'indice PMV des individus au sein de cet environnement dynamique (FIGURE 18).

L'expérience sur terrain s'est déroulée entre le 7 février 2022 et le 7 mars 2022. Durant ce laps de temps, la volontaire B n'a pas rendu de logbook car elle était absente et la personne D n'a pas agi sur le rétablissement de son éventuel inconfort. Cependant, les autres occupants ont pu répertorier toutes leurs actions dans les logbooks personnels.

Pour donner un exemple des données collectées, et expliquer la méthodologie d'interprétation des résultats, le graphe suivant représente simultanément le PMV du local calculé sur le logiciel CBE (CBE Thermal Comfort Tool, n.d.) à l'aide des données récoltée par l'appareil TESTO 480, le PMV ressenti de la volontaire A et les différentes actions produites par cette dernière concernant son confort thermique. Cependant il est utile de préciser que l'appareil Testo 480 a malencontreusement arrêté d'enregistrer les données du local le 17-02. Après cette date, les données sont donc extrapolées sur base de celles enregistrées lors de la première semaine de l'expérience.

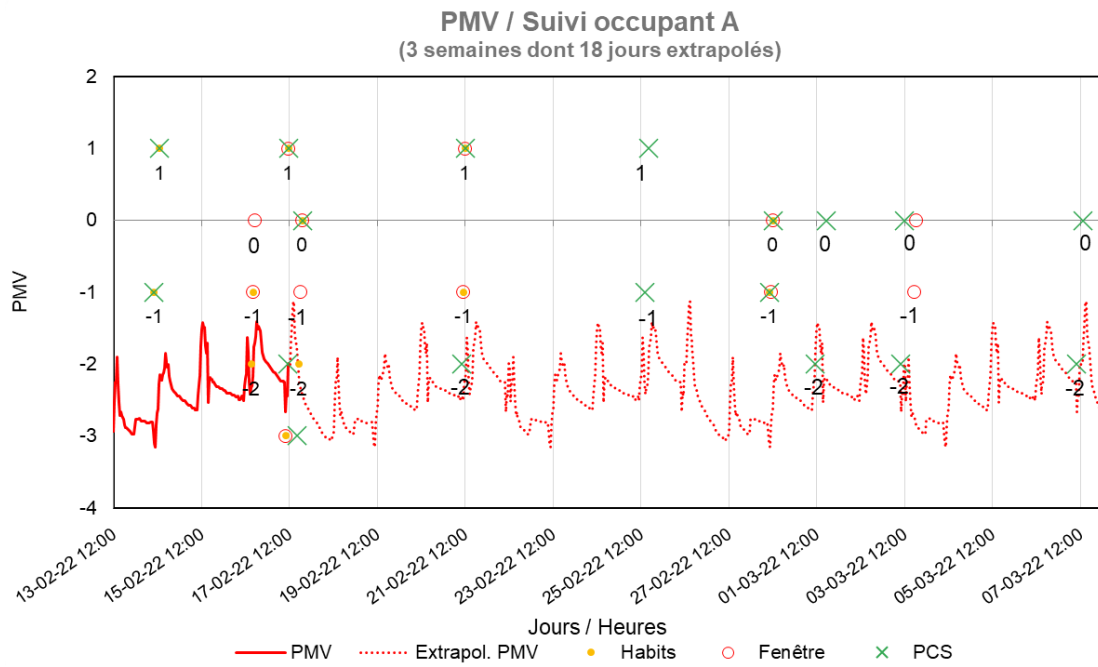


FIGURE 20: Valeurs de PMV et du suivi de l'occupant A collectés dans le local A017 pour la période du 8-02 au 7-03 2022

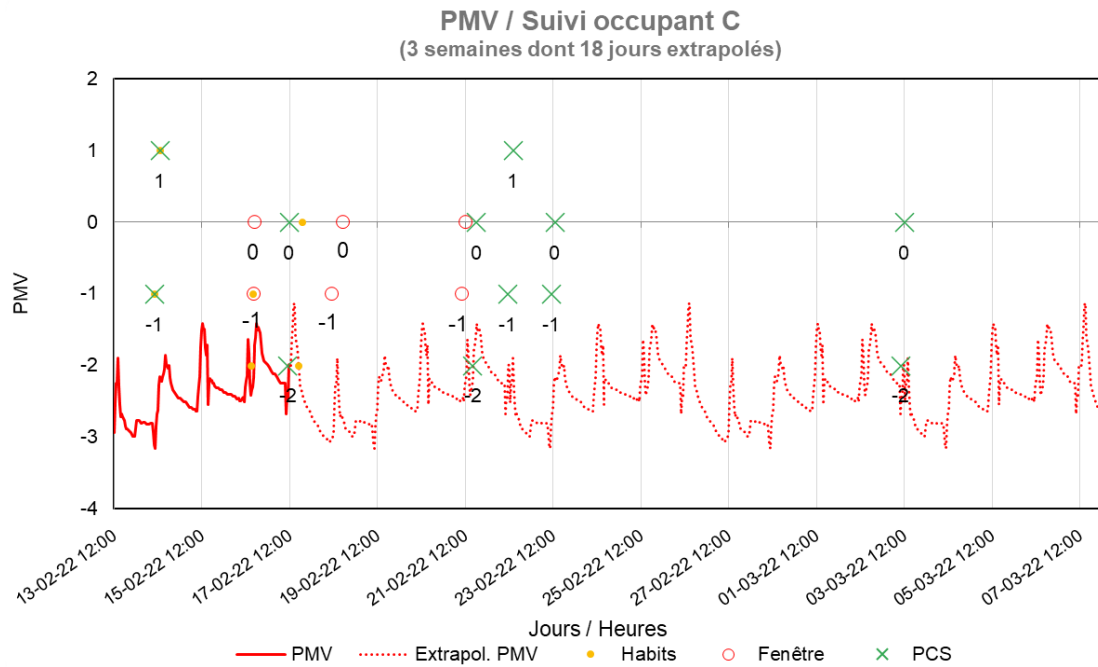


FIGURE 21: Valeurs de PMV et du suivi de l'occupant C collectés dans le local A017 pour la période du 8-02 au 7-03 2022

Plusieurs observations de premier ordre en ont découlé. La volontaire A se trouvant à l'entrée du local, à côté de la porte, à eu recours à plus d'action que le volontaire C. Effectivement, pendant la période du 8-02 au 7-03 2022, on observe 23 actions permettant de réguler le confort thermique chez la personne A (FIGURE 20) alors que la personne C en a répertorié 11 (FIGURE 21). Les 23 actions se classent en 3 catégories d'initiatives différentes. La première concerne tout ce qui touche à l'ajustement de l'habillement et se comptent au nombre de 8 (l'occupante A ajustait majoritairement son niveau d'habillement avec son écharpe/foulard). Les actions portant sur le jeu des ouvertures de fenêtres entrent dans la deuxième catégorie et sont au nombre de 6 pour cette occupante. Enfin, la dernière catégorie porte sur l'utilisation des PCS. En réalité, la personne A a utilisé 9 fois un dispositif de confort personnel afin de réguler son confort thermique (on peut lire dans ce logbook que cette personne a une préférence pour les panneaux chauffants fixes).

La personne C se montre moins frileuse que la personne A car elle a enregistré 11 actions. Le volontaire C enregistre 2 actions pour la première catégorie, 3 pour la seconde et 6 pour la dernière.

Toutes ces actions permettent d'augmenter le confort thermique des volontaires. En effet on remarque une augmentation de leur vote sur l'échelle de sensation thermique de Fanger entre l'avant et l'après un ajustement de confort personnel. Ces actions ont permis aux volontaires de se rapprocher d'un vote de sensation neutre (voir échelle du "vote moyen prévisible" dans la section 1.3.1.).

Afin de poursuivre l'analyse des résultats, nous allons nous pencher plus précisément sur les comportements adaptatifs de l'occupante A et C durant la période du 13 au 17 février 2022 car pour rappel l'appareil TESTO 480 a enregistré les valeurs moyennes de températures, le niveau d'humidité de l'air ainsi que la vitesse de l'air jusqu'au 17-02. Le logbook quant à lui, a été distribué le 13-02. C'est donc dans cette période (13-02 au 17-02) que nous pouvons comparer précisément les comportements adaptatifs des volontaires avec les valeurs moyennes de températures et de PMV du local. Il est évident que cette analyse nous donne un nombre limité d'informations. Cependant, cela nous explique la méthodologie de cette expérience (FIGURE 22).

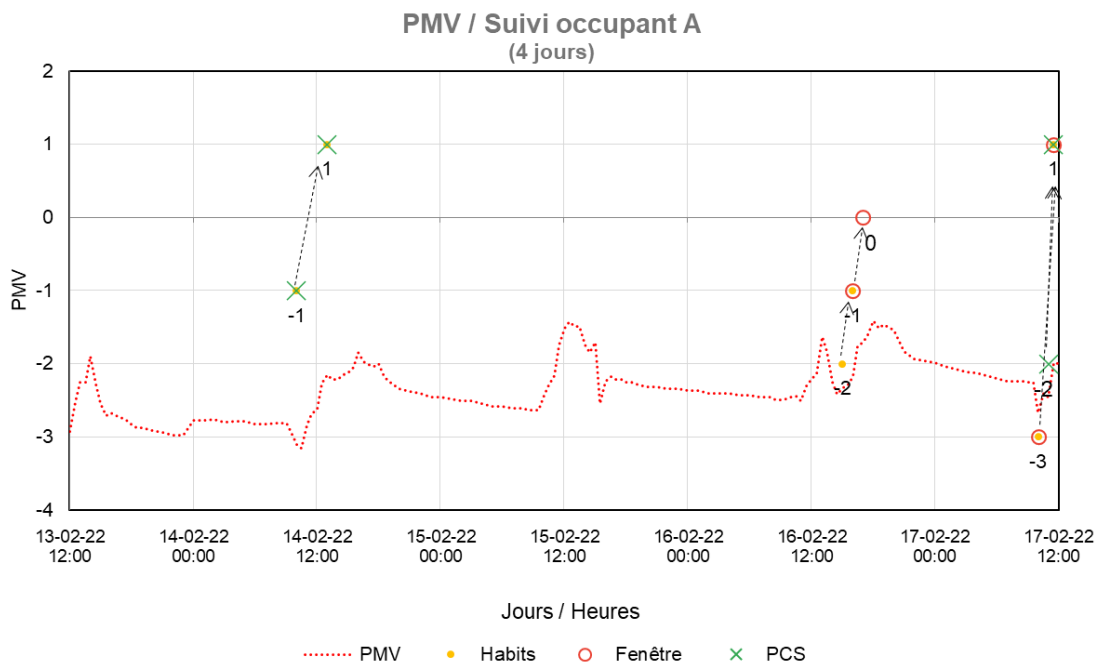


FIGURE 22: Valeurs de PMV et du suivi de l'occupant A collectés dans le local A017 pour la période du 13-02 au 17-02 2022

La figure ci-dessous (FIGURE 22) représente les effets combinés des différentes actions produites par la volontaire A. Celles-ci sont répertoriées en 3 catégories dont la première reprend les ajustements vestimentaires, ensuite nous retrouvons les interventions concernant les ouvertures/fermetures des fenêtres et enfin les PCS. Les différentes actions se produisent séparément ou simultanément.

Ajouter une couche de vêtement (majoritairement un pull ou une écharpe), est le premier réflexe de cette volontaire en cas de PMV ressenti -3. Cette action permet d'augmenter le confort thermique jusqu'à un ressenti PMV de -1. Les PCS quant à eux permettent de passer de -2 à 1 en ressenti positif. Il est remarquable que les ressentis PMV de cette occupante ne sont pas en accord avec la température opérative dans le local (FIGURE 22).

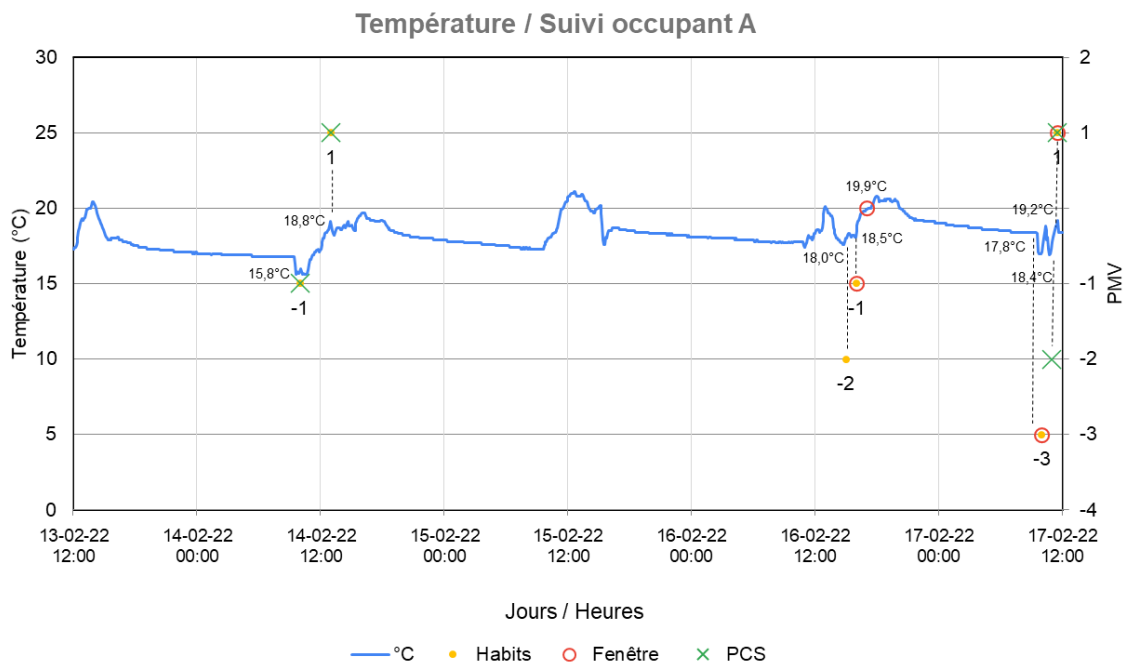


FIGURE 23: Valeurs de températures et du suivi de l'occupant A collectés dans le local A017 pour la période du 13-02 au 17-02 2022

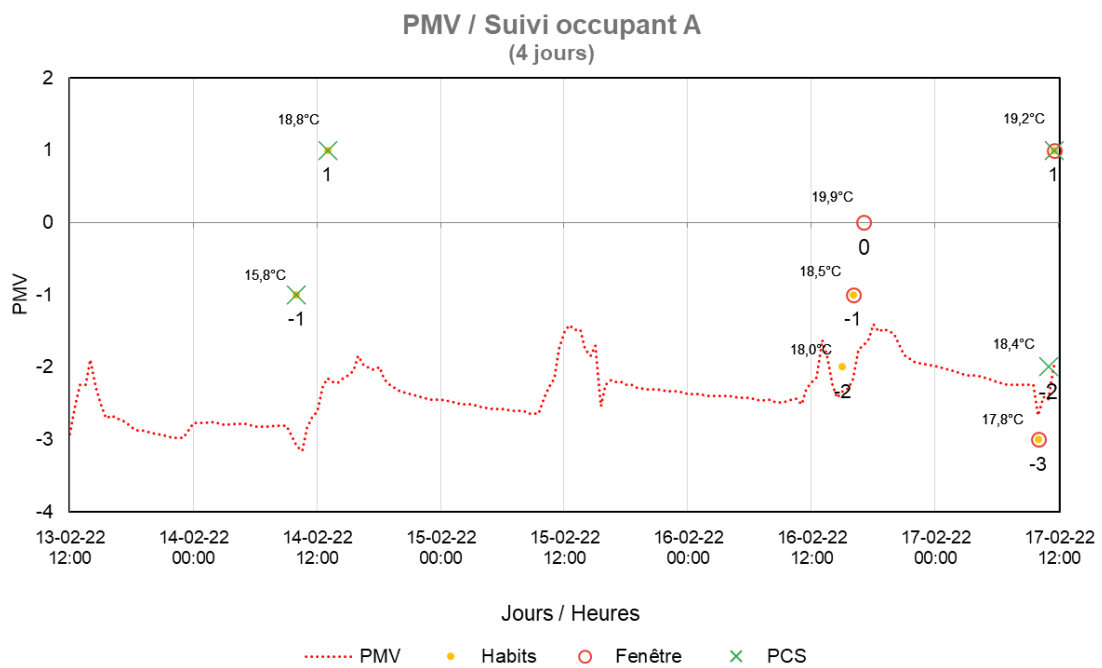


FIGURE 24: Valeurs de PMV, du suivi de l'occupant A et températures de déclenchement des actions collectés dans le local A017 pour la période du 13-02 au 17-02 2022

Lors de l'utilisation du PCS le 14-02 à 10h, la température du local est de 15,8 °C et ceci correspond à un PMV ressenti de -1 or, le 17-02 à 11h lorsque le niveau d'habillement est modifié, la température est de 18,4 °C et correspond à un PMV ressenti de -3 (FIGURE 24).

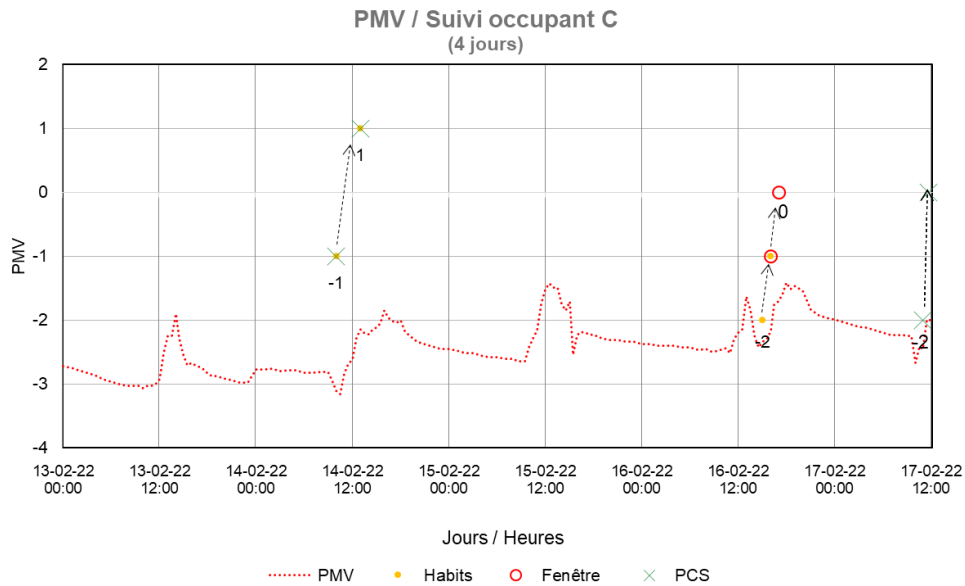


FIGURE 25: Valeurs de PMV et du suivi de l'occupant C collectés dans le local A017 pour la période du 8-02 au 17-02 2022

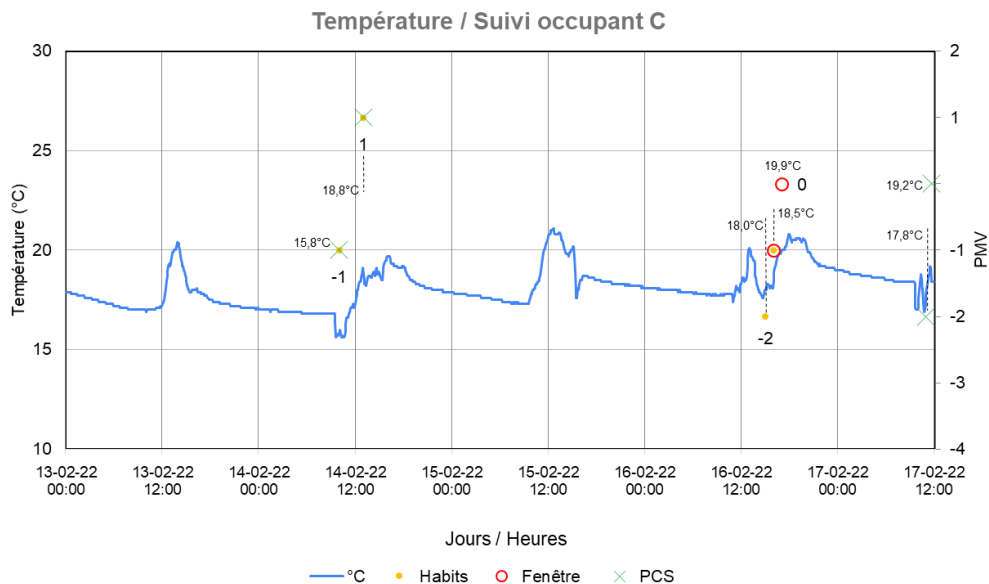


FIGURE 26: Valeurs de températures et du suivi de l'occupant C collectés dans le local A017 pour la période du 13-02 au 17-02 2022

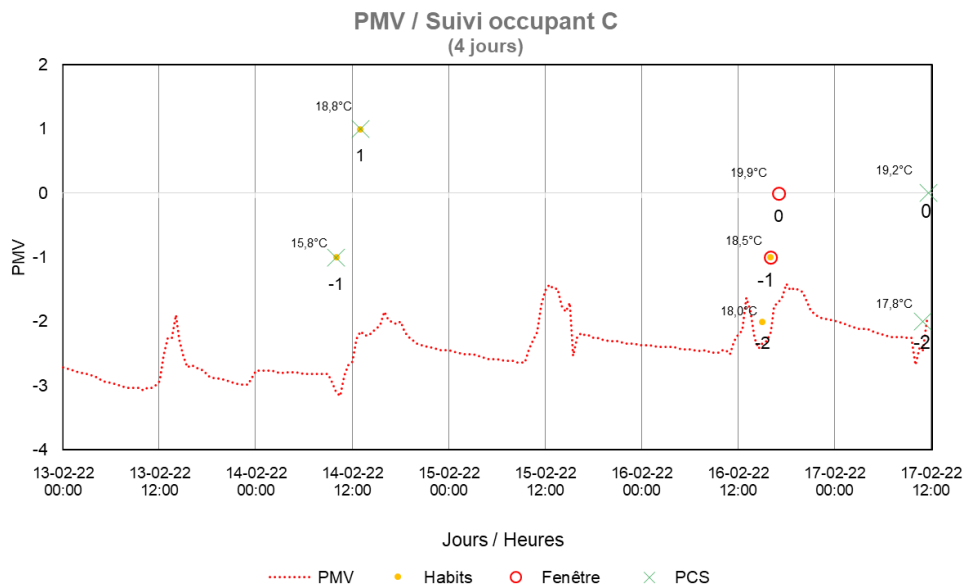


FIGURE 27: Valeurs de PMV, du suivi de l'occupant A et températures de déclenchement des actions collectés dans le local A017 pour la période du 13-02 au 17-02 2022

Les résultats des effets combinés des différentes actions produites par la volontaires C sont similaires lors de la période du 13-02 au 16-02 (FIGURE 25) . Cependant ils diffèrent à partir du 17-02. En effet, au début de l'expérience, les volontaires ont découvert ensemble les différentes possibilités d'ajuster leur confort thermique. Cela explique la similarités des résultats durant ces trois premiers jours.

5.1. L'interview semi-structurée

Afin de récolter un feedback précis et personnel des volontaires au terme de l'expérience de ce TFE, l'interview semi-structurée ou semi-directive a été privilégiée. En effet, celle-ci est utilisée de préférence lorsqu'il s'agit d'organiser une étude qualitative. Elle permet de combiner la rigueur des thématiques ainsi que les différents thèmes abordés. Pour obtenir des retours de qualité, l'entretien se compose d'une série d'interrogations ouvertes. Elles sont donc préparées en amont et les données recueillies sont interprétées en direct pour permettre de mieux diriger l'interrogation. Cela apporte donc une grande souplesse dans l'échange.

A. Connaissance préalable des volontaires

Etant donné que les chercheurs qui se sont portés volontaires pour l'expérience font partie de la cellule de recherche Architecture et climat, ils ont une connaissance préalable des PCS aux niveaux théoriques (de par leurs lectures de revues scientifiques). Par contre, il ressort de l'interview que les quatre volontaires n'ont pas cette connaissance au niveau pratique.

B. Préférence d'un PCS en particulier

Du fait de leur mobilité, les panneaux chauffants de 300 WATTS sont privilégiés par les volontaires qui les agencent sur leur bureau à proximité du haut du corps ou à terre proche de leurs jambes et de leurs pieds. Il ressort des entretiens que les sources de chaleur proches du visage sont nettement moins appréciées que celles proches du bas du corps car celles-ci apportent une sensation de confort considérable.

C. Interaction entre les volontaires

L'expérience a rapproché les volontaires entre eux dès lors qu'ils se motivaient et se rappelaient mutuellement de bien remplir les formulaires journaliers et logbooks. Cela les a en partie aidés à se prêter aux conditions de l'expérience. Cette dernière a aidé à mettre une ambiance conviviale dans la salle et a fréquemment amené à des interactions sous forme de feedbacks sur la sensation thermique ressentie par chaque occupant.

D. Conséquence de la pandémie du COVID 19

La crise sanitaire et économique déclenchée par la pandémie du COVID-19 et les mesures d'éloignement physique obligent les travailleurs partageant un même espace à modifier leur relation avec leur lieu de travail. Il y a nécessairement des répercussions sur les attentes de confort et de qualité des espaces. Dans le cadre de cette expérience, on retrouve notamment une volonté d'aération continue de l'environnement intérieur et ce, malgré les conditions extérieures hivernales. Ce conditionnement sanitaire a mis en exergue un constat : il est plus instinctif pour l'occupant de l'espace intérieur d'agir sur leur degré d'habillement et sur l'utilisation des PCS avant d'intervenir sur les ouvertures.

Ouvertes, celles-ci apportent d'une part un certain confort psychologique quant au renouvellement d'air nécessaire dans cette crise sanitaire et, d'autre part, un certain refroidissement de l'espace dû aux courants d'air.

E. Durée de l'expérience

La question ici visait à déterminer si la connaissance par rapport à la durée de l'expérience avait un impact psychologique sur l'acceptation des conditions thermiques proposées par l'expérience. La réponse à cette question était unanime.

Non, la conscience concernant la durée de l'expérience n'a pas eu de répercussion sur les sujets car ceux-ci avaient assez d'outils à disposition afin de rester dans une situation de confort thermique.

6. Discussion

6.1 Effets du chauffage local sur la perception thermique

Dans le cadre de ce travail, nous avons défini le confort comme "l'état d'esprit qui exprime la satisfaction à l'égard de l'environnement [...] et qui est évalué par une appréciation subjective" (ASHRAE Standard 55, 2013). Il peut être considéré comme étant la satisfaction liée à la perception individuelle, à l'acceptation des conditions environnementales (ressenti à un moment donné) (Altomonte et al., 2020). Le bien-être quant à lui, qu'il soit physique ou psychique, peut être défini comme un état agréable mais transitoire, procuré par la satisfaction des besoins du corps et par la tranquillité de l'esprit (Dictionnaire médical, n.d.).

Suite à l'observation des résultats et de l'interview semi structurée, on peut dire que, dans un environnement thermique dynamique, le confort des volontaires augmente car ils ont une grande tolérance par rapport aux différentes ambiances thermiques dès lors qu'ils peuvent contrôler les conditions d'ambiances. Cette capacité de contrôle personnel de la sensation de confort thermique leur permet de se sentir bien sur le moment même et également sur le moyen/long terme, cela a un impact sur leur bien-être.

Lorsque l'on atteint des températures inférieures à 18°C, on remarque que les volontaires se penchent davantage sur le potentiel des PCS car l'ajout d'un vêtement ou la fermeture des fenêtres ne suffisent plus à rétablir le confort thermique.

Il est reconnu (H. Zhang, Arens, Huizenga, et al., 2010) que les extrémités sont les parties les plus froides du corps humain et que le chauffage des extrémités peut augmenter de manière significative la température de la peau et ainsi favoriser la circulation sanguine ainsi que le confort thermique local. En conséquence, la sensation thermique locale et la sensation thermique globale du corps sont grandement améliorées.

Les radiateurs chauffants dirigés vers les pieds et les jambes ont produit des effets importants. Les jambes et les cuisses sont des parties du corps plus influentes dans la réception des stimuli froids locaux. Les effets importants observés sur les radiateurs chauffants visant les pieds et les mollets pourraient être attribués à la grande surface chauffée et à la grande sensibilité thermique des mollets.

On remarque que le réchauffement du visage est perçu comme plus inconfortable que le réchauffement de la poitrine, de l'abdomen et des cuisses.

6.2 Les décisions personnelles de réglage

En raison des différences individuelles dans la perception de l'environnement thermique, les décisions personnelles de réglages de la température ambiante ou de la ventilation dans le bureau ont un impact direct sur le confort des autres occupants, qui aspirent à d'autres réglages. Etant donné que les PCS sont mis à disposition de façon individuelle, les occupants ont la capacité de créer des conditions environnementales favorables autour d'eux. Dans l'expérience, les volontaires A et C ont déployé les PCS à des périodes différentes et ce, pendant un laps de temps variable.

6.3 Conséquence psychologique de la pandémie du COVID 19 sur le bien-être

Certainement, la pandémie du COVID 19 nous a quelque peu amené des répercussions sur les attentes de confort et la qualité des espaces. L'expérience menée dans le cadre de ce travail de recherche nous l'a confirmé. Il est intéressant de constater que fermer la fenêtre lors d'un ressenti thermique froid n'est plus nécessairement le premier réflexe des occupants d'un lieu. L'aspect psychologique de cette pandémie est bien présent. En effet, il y a maintenant, encore plus qu'avant la pandémie, un besoin d'aérer et d'assainir l'air intérieur ambiant dans les bâtiments. Malgré les conditions météorologiques (vent, pluie,...) et les basses températures

extérieures, les occupants du local A017 souhaitent garder les fenêtres ouvertes le plus longtemps possible (jusqu'à la limite du supportable)

7. Conclusion

Ce travail a pour objectif de vérifier l'impact de l'utilisation des systèmes de confort personnel (PCS) comme aide pour le confort individuel dans les espaces de bureaux partagés. Afin d'y répondre, l'expérience aménagée spécialement dans le cadre de ce mémoire s'est déroulée dans un environnement thermique dynamique aménagé spécialement à cet effet. Elle permet aux occupants du local choisi d'utiliser un nombre libre de PCS afin d'assurer leur confort.

Les deux modèles du confort thermique (adaptatif et celui de Fanger (PMV-PPD)) partagent des limites similaires, ayant été développés à partir de données recueillies dans des conditions étroitement contrôlées, ou étant restreints par des hypothèses de recherche limitées. En adoptant ces modèles, la plupart des normes ont supposé que la performance énergétique et la satisfaction des occupants peuvent être obtenues en maintenant les variations des paramètres de l'environnement intérieur dans une gamme étroite de conditions moyennes. Cela implique de fournir des environnements globalement stables qui visent l'acceptabilité pour une population "générale" sans tenir compte de la variabilité inter- et intra-individuelle de leurs utilisateurs (c'est-à-dire, respectivement, la variance observée entre les personnes, et au sein d'une même personne à différents moments ou dans différents contextes ou situations). Une telle approche réductrice, qui tend presque vers l'ennui environnemental, ignore effectivement les variations de perception et d'évaluation subjective qui déterminent les préférences et les besoins des utilisateurs (Altomonte et al., 2020).

On l'a vu, la prédiction du confort des PMV dans l'environnement intérieur s'est avérée loin d'être une estimation correcte du confort réel des occupants. En effet le PMV ressenti des volontaires exprime le confort ressenti à un moment donné. Dans un environnement thermique intérieur stable, le système de thermorégulation humain est beaucoup moins sollicité pour maintenir une température corporelle centrale constante. Le métabolisme de chacun, ou la production de chaleur interne au corps humain a une influence sur la quantité de chaleur produite par le corps humain et donc sur la perception d'un environnement chaud ou froid. Au contraire, les espaces offrant des stimuli dynamiques (variables) répondent à l'amélioration du confort thermique et du bien-être des utilisateurs.

Il en est ressorti que le confort thermique dans un environnement dynamique peut être amélioré par des PCS. En effet, ces derniers permettent d'ajuster le confort de l'occupant pour arriver à la neutralité sur l'échelle de sensation thermique. Ils opèrent de concert avec des ajustements personnels (modifier son niveau d'habillement) ou des ajustements techniques (ouvrir les fenêtres, utiliser des PCS, ajuster leurs potentiels et choisir leur position).

Les atouts propres aux PCS seront intéressants aussi bien pour les anciens édifices que pour les bâtiments plus récents. La plupart des immeubles de bureaux existants étant équipés de systèmes HVAC peuvent personnaliser l'utilisation des PCS disponibles par la simple modification de la température et en installant des PCS pour maintenir des niveaux de confort comparables ou même, meilleurs.

Les PCS sont forts appréciés par les occupants du fait qu'ils leur permettent de profiter d'un confort thermique personnalisable propre aux bureaux individuels, tout en conservant les externalités positives inhérentes aux espaces de bureaux partagés.

Cette nouvelle solution de chauffage fonctionnant de pair avec le phénomène d'alliesthésie, crée une sensation de confort complètement différente sur deux aspects. Comme prévu, le conditionnement local est d'abord capable de modifier de manière significative la température locale de la peau. Près de la condition thermique neutre, le changement de la température de la peau en réponse au chauffage/refroidissement local est plus important dans les segments corporels ciblés qui ont une température initiale de la peau plus basse/haute (Parkinson & de Dear, 2014). Le visage, le cou et la poitrine répondent plus fortement à un stimulus froid et les pieds sont plus sensibles à un stimulus chaud. Enfin, en ce qui concerne le style de vie de l'occupant. Ce dernier est plus en harmonie avec ses besoins et se concentre sur lui-même et contrôle son confort thermique de manière optimale.

Au terme de ce travail, il nous paraît évident que la recherche sur le confort thermique ainsi que le bien-être individuel est notoirement difficile au vu de nombreux facteurs influents et leurs interactions affectent simultanément la perception humaine. Ce constat vaut également pour l'étude des PCS visant à fournir du confort. Par ailleurs, il convient de relever que trois grandes catégories de facteurs peuvent faire varier l'efficacité des PCS: les facteurs environnementaux, les facteurs liés à l'utilisateur et les facteurs liés au système.

Quatrième partie: Annexes

Information sheet

Hello, my study aims to determine the satisfaction of occupants with their thermal comfort and well-being in their indoor work environment. The study is conducted in the framework of my TFE in scientific research and applied physics at the LOCI Faculty, UCLouvain.

The general research question of this TFE is entitled: "In a context of work transformation and sustainable development, how and which personal comfort devices can act on the well-being of teleworking subjects (while controlling the energy consumption of the housing)?"

As part of this study, you will be asked to complete a questionnaire that asks you to indicate your current level of satisfaction with a number of factors in your workplace and the building as a whole including temperature. All forms have already received ethical approval.

All information collected will be handled in accordance with current data protection regulations.

The individual identities of the respondents will not be collected in this study, nor will any personal comments made be recognizable in internal or published documents. By signing this form, you agree to participate in the study and consent to the extraction of anonymous statistical data from the responses you provide. You retain the right to withdraw the data you have provided to the study at any time. All data collected in this study will be stored in accordance with UCLouvain regulations.

Thank you for your cooperation.

*Obligatoire

1. Adresse e-mail *

Sans titre

Consent form

Project: Study on well-being in the workplace

Name of researcher: Emeline Joris

Sponsors of the TFE: Prof. Sergio Altomonte and Geoffrey Van Moesek

Please fill in the following boxes:

2. 1. I have read the information sheet and the nature and purpose of the study has been explained to me. I understand and agree to participate.

Plusieurs réponses possibles.

Yes

3. 2. I understand the purpose of this project and my involvement in it. *

Plusieurs réponses possibles.

Yes

4. 3. I understand that I can withdraw from the survey at any time and that this will not affect my status now or in the future. In addition, all data collected will also be removed from the study.

Plusieurs réponses possibles.

Yes

5. 4. I understand that although the information obtained during the study will be used for academic evaluation purposes, I will not be identified and all data I have provided will remain anonymous and completely confidential.

Plusieurs réponses possibles.

Yes

6. 5. I understand that data from this study will be stored in a secure location in accordance with University regulations. Electronic data will be stored on a secure, password protected hard drive. Only the researcher(s), module organizer listed above, and individual participants will have access, upon written request, to this data.

Plusieurs réponses possibles.

Yes

7. 6. I understand that I may contact the researcher or module organizer at any time if I need more information about the study.

Plusieurs réponses possibles.

Yes

Passer à la question 8

Personal data

8. What gender are you? *

Une seule réponse possible.

Male

Female

9. How old are you? *

Une seule réponse possible.

18-25 years old

25-40 years old

+40 years old

10. How many years have you been working in this building? *

Une seule réponse possible.

< 1 year

1 to 2 years

3 to 5 years

> 5 years

11. How long have you worked in your current office? *

Une seule réponse possible.

- < 3 months
- 4 to 6 months
- 7 to 12 months
- > 1 year

12. Consider a typical week, how many hours do you work in your office? *

Une seule réponse possible.

- < 10h
- 11 to 30h
- > 30h

Thermal comfort

13. In your workspace, what element(s) can you thermally control? *

Plusieurs réponses possibles.

- Curtain or blind
- Open the window
- Permanent heating
- Additional heating
- General air conditioning system
- Personal air conditioning system
- Door to the interior space
- Door to the exterior space
- none of these responses
- Autre : _____

14. Are you satisfied with the temperature of your workspace? *

Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5	
Not satisfied	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Very satisfied

15. How would you describe your source of thermal discomfort? *

Plusieurs réponses possibles.

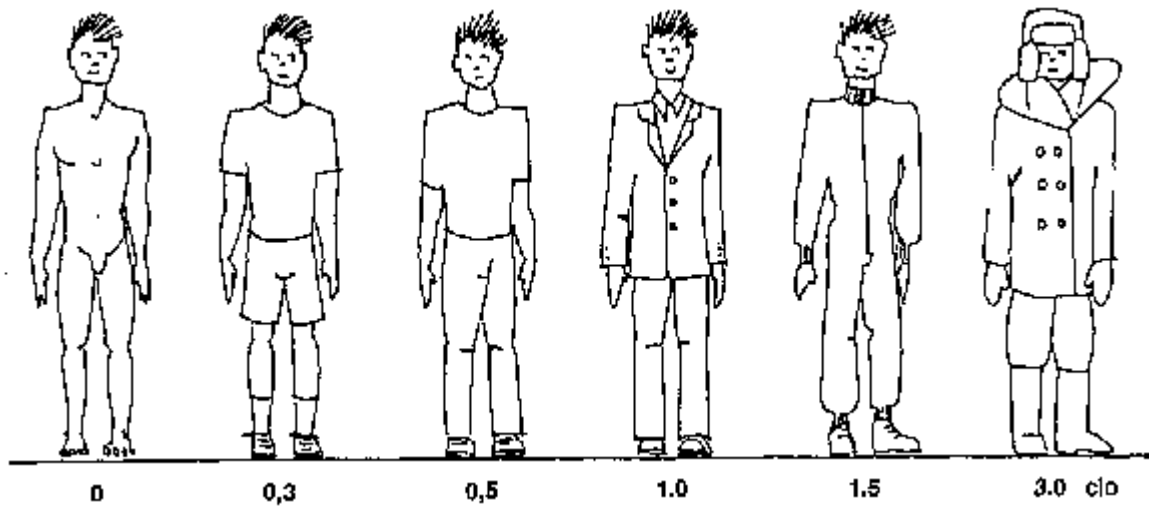
- Too much humidity
- Not enough humidity
- Air flow
- No ventilation
- Lack of sun protection
- Heat from your equipment (computer, plugs,...)
- Autre : _____

Thank you for your participation

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google.

Google Forms

	<u>clo</u>	<u>check</u>		<u>clo</u>	<u>check</u>
Underwear			Dress and Skirts		
Bra	0.01	<input type="checkbox"/>	Skirt (thin)	0.14	<input type="checkbox"/>
Panties	0.03	<input type="checkbox"/>	Skirt (thick)	0.23	<input type="checkbox"/>
Men's briefs	0.04	<input type="checkbox"/>	Sleeveless, scoop neck (thin)	0.23	<input type="checkbox"/>
T-shirt	0.08	<input type="checkbox"/>	Sleeveless, scoop neck (thick)	0.27	<input type="checkbox"/>
Half-slip	0.14	<input type="checkbox"/>	Short-sleeve shirtdress (thin)	0.29	<input type="checkbox"/>
Long underwear bottoms	0.15	<input type="checkbox"/>	Long-sleeve shirtdress (thin)	0.33	<input type="checkbox"/>
Long underwear top	0.20	<input type="checkbox"/>	Long-sleeve shirtdress (thick)	0.47	<input type="checkbox"/>
Footwear			Trousers and Coveralls		
Ankle-length athletic socks	0.02	<input type="checkbox"/>	Short shorts	0.06	<input type="checkbox"/>
Pantyhose/stockings	0.02	<input type="checkbox"/>	Walking shorts	0.08	<input type="checkbox"/>
Sandals/thongs	0.02	<input type="checkbox"/>	Straight trousers (thin)	0.15	<input type="checkbox"/>
Shoes	0.02	<input type="checkbox"/>	Straight trousers (thick)	0.24	<input type="checkbox"/>
Calf-length socks	0.03	<input type="checkbox"/>	Sweatpants	0.28	<input type="checkbox"/>
Knee socks (thick)	0.06	<input type="checkbox"/>	Overalls	0.30	<input type="checkbox"/>
Boots	0.10	<input type="checkbox"/>	Coveralls	0.49	<input type="checkbox"/>
Shirts and Blouses			Suit Jackets and Vests		
Sleeveless/scoop-neck blouse	0.12	<input type="checkbox"/>	Sleeveless vest (thin)	0.10	<input type="checkbox"/>
Short-sleeve knit sport shirt	0.17	<input type="checkbox"/>	Sleeveless vest (thick)	0.17	<input type="checkbox"/>
Short-sleeve dress shirt	0.19	<input type="checkbox"/>	Single-breasted (thin)	0.36	<input type="checkbox"/>
Long-sleeve dress shirt	0.25	<input type="checkbox"/>	Single-breasted (thick)	0.44	<input type="checkbox"/>
Long-sleeve flannel shirt	0.34	<input type="checkbox"/>	Double-breasted (thin)	0.42	<input type="checkbox"/>
Long-sleeve sweatshirt	0.34	<input type="checkbox"/>	Double-breasted (thick)	0.48	<input type="checkbox"/>
Sweaters			Clo value (sum of individual values) = _____		
Sleeveless vest (thin)	0.13	<input type="checkbox"/>			
Sleeveless vest (thick)	0.22	<input type="checkbox"/>			
Long-sleeve (thin)	0.25	<input type="checkbox"/>			
Long-sleeve (thick)	0.36	<input type="checkbox"/>			



[Parkinson, T., & de Dear, R. \(2016\). Thermal pleasure in built environments: Spatial alliesthesia from air movement. *Building Research & Information*, 45\(3\), 320–335.](#)
<https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1140932>

Cinquième partie: Bibliographie

Références

- Allen, J. G., MacNaughton, P., Laurent, J. G. C., Flanigan, S. S., Eitland, E. S., & Spengler, J. D. (2015). Green buildings and health. *Current Environmental Health Reports*, 2(3), 250–258. <https://doi.org/10.1007/s40572-015-0063-y>
- Altomonte, S., Allen, J., Bluysen, P. M., Brager, G., Hescong, L., Loder, A., Schiavon, S., Veitch, J. A., Wang, L., & Wargocki, P. (2020). Ten questions concerning well-being in the built environment. *Building and Environment*, 180, 106949. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106949>
- Arens, E., Zhang, H., & Huizenga, C. (2006). Partial- and whole-body thermal sensation and comfort—Part II: Non-uniform environmental conditions. *Journal of Thermal Biology*, 31(1–2), 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2005.11.027>
- ASHRAE Standard 55. (2013).
- Bonte, M. (2014). *Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment: Modélisation par intelligence artificielle et mesures in situ* (p. 188).
- BREEAM. (2022, February 23). BRE Group. <https://bregroup.com/products/breeam/?cn-reloaded=1>
- Bruxelles environnement. (n.d.). *Notions*. <https://www.guidebatimentdurable.brussels/assurer-confort-thermique/notions>
- C. Talon, N. Goldstein. (2015). *Smart offices: how intelligent building solutions are changing the occupant experience*.
- Campbell, I. (2008). Body temperature and its regulation. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 9(6), 259–263. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2008.04.009>
- CBE thermal comfort tool. (n.d.). <https://comfort.cbe.berkeley.edu>
- Celi, F. S., Brychta, R. J., Linderman, J. D., Butler, P. W., Alberobello, A. T., Smith, S., Courville, A. B., Lai, E. W., Costello, R., Skarulis, M. C., Csako, G., Remaley, A., Pacak, K., & Chen, K. Y. (2010). Minimal changes in environmental temperature result in a significant increase in energy expenditure and changes in the hormonal homeostasis in healthy adults. *European Journal of Endocrinology*, 163(6), 863–872. <https://doi.org/10.1530/eje-10-0627>
- Chatonnet, J., & Cabanac, M. (1965). The perception of thermal comfort. *International Journal of Biometeorology*, 9(2), 183–193. <https://doi.org/10.1007/bf02188475>
- Cheshmehzangi, A. (2020). Housing and health evaluation related to general comfort and indoor thermal comfort satisfaction during the COVID-19 lockdown. *Journal of*

Human Behavior in the Social Environment, 31(1–4), 184–209.
<https://doi.org/10.1080/10911359.2020.1817225>

- d’Ambrosio Alfano, F. R., Palella, B. I., & Riccio, G. (2011). The role of measurement accuracy on the thermal environment assessment by means of PMV index. *Building and Environment*, 46(7), 1361–1369. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.001>
- Dauncey, M. J. (1981). Influence of mild cold on 24 h energy expenditure, resting metabolism and diet-induced thermogenesis. *British Journal of Nutrition*, 45(2), 257–267. <https://doi.org/10.1079/bjn19810102>
- de Dear, R. (2011). Revisiting an old hypothesis of human thermal perception: Alliesthesia. *Building Research & Information*, 39(2), 108–117. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.552269>
- de Dear, R., Brager, G., & D., C. (1997). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference - Final Report on RP-884*. (Vol. 104).
- de Dear, R. J., Akimoto, T., Arens, E. A., Brager, G., Candido, C., Cheong, K. W. D., Li, B., Nishihara, N., Sekhar, S. C., Tanabe, S., Toftum, J., Zhang, H., & Zhu, Y. (2013). Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*, 23(6), 442–461. <https://doi.org/10.1111/ina.12046>
- Dictionnaire médical. (n.d.). *Définition de “bien-être.”* Dictionnaire Médical. Retrieved June 13, 2022, from <https://www.dictionnaire-medical.fr/definitions/027-bien-etre/>
- Energie+. (2007, September 25). *Confort thermique : Généralité*. <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/>
- Erickson, V. L., & Cerpa, A. E. (n.d.). *Thermovote*. Proceedings of the Fourth ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings - BuildSys ’12. Retrieved April 5, 2022, from <http://dx.doi.org/10.1145/2422531.2422534>
- Fanger, P. O. (1973). Assessment of man’s thermal comfort in practice. *Occupational and Environmental Medicine*, 30(4), 313–324. <https://doi.org/10.1136/oem.30.4.313>
- Fanger, P. O. (1988). FUNDAMENTALS OF THERMAL COMFORT. In *Advances In Solar Energy Technology* (pp. 3056–3061). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-034315-0.50562-0>
- Filingeri, D., Fournet, D., Hodder, S., & Havenith, G. (2014). Body mapping of cutaneous wetness perception across the human torso during thermo-neutral and warm environmental exposures. *Journal of Applied Physiology*, 117(8), 887–897. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00535.2014>
- Ghahramani, A., Zhang, K., Dutta, K., Yang, Z., & Becerik-Gerber, B. (2016). Energy savings from temperature setpoints and deadband: Quantifying the influence of building and system properties on savings. *Applied Energy*, 165, 930–942.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.115>

Godithi, S. B., Sachdeva, E., Garg, V., Brown, R., Kohler, C., & Rawal, R. (2018). A review of advances for thermal and visual comfort controls in personal environmental control (PEC) systems. *Intelligent Buildings International*, *11*(2), 75–104.
<https://doi.org/10.1080/17508975.2018.1543179>

GUIDEnR HQE, l'information Haute Qualité Environnementale. (n.d.). *GuidEnR HQE > L'approche adaptative du confort thermique > Les modèles adaptatifs*.
<http://www.hqe.guidenr.fr/cible-8-hqe/confort-thermique-modele-adaptatif.php>

Heating, ventilation and air conditioning guide. (2020, January 16).
<https://www.carbontrust.com/resources/heating-ventilation-and-air-conditioning-guide>

ISO 7730:2005. (n.d.). <https://www.iso.org/fr/standard/39155.html>

Jazizadeh, F., Ghahramani, A., Becerik-Gerber, B., Kichkaylo, T., & Orosz, M. (2014). Human-Building interaction framework for personalized thermal comfort-driven systems in office buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *28*(1), 2–16.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000300](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000300)

Jin, Q., Duanmu, L., Zhang, H., Li, X., & Xu, H. (2011). Thermal sensations of the whole body and head under local cooling and heating conditions during step-changes between workstation and ambient environment. *Building and Environment*, *46*(11), 2342–2350. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.017>

Karjalainen, S. (2007). Gender differences in thermal comfort and use of thermostats in everyday thermal environments. *Building and Environment*, *42*(4), 1594–1603.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.01.009>

Kim, J., Schiavon, S., & Brager, G. (2018). Personal comfort models – A new paradigm in thermal comfort for occupant-centric environmental control. *Building and Environment*, *132*, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.023>

Ko, W. H., Schiavon, S., Zhang, H., Graham, L. T., Brager, G., Mauss, I., & Lin, Y.-W. (2020). The impact of a view from a window on thermal comfort, emotion, and cognitive performance. *Building and Environment*, *175*, 106779.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106779>

Kobayashi, Y., & Tanabe, S. (2013). Development of JOS-2 human thermoregulation model with detailed vascular system. *Building and Environment*, *66*, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.013>

Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *86*(2), 225–234.
<https://doi.org/10.1175/bams-86-2-225>

LEED rating system. (n.d.). U.S. Green Building Council. Retrieved May 31, 2022, from

<https://www.usgbc.org/leed>

- Luo, M., Wang, Z., Zhang, H., Arens, E., Filingeri, D., Jin, L., Ghahramani, A., Chen, W., He, Y., & Si, B. (2020). High-density thermal sensitivity maps of the human body. *Building and Environment*, 167, 106435. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106435>
- Météo pour Louvain-la-Neuve en Février 202: Températures et table climatique - Climate-Data.org2.* (n.d.). <https://fr.climate-data.org/europe/belgique/wallonie/louvain-la-neuve-12832/t/février-2/>
- Miura, M., & Ikaga, T. (2016). Human response to the indoor environment under fluctuating temperature. *Science and Technology for the Built Environment*, 22(6), 820–830. <https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1184550>
- Nakamura, M., Yoda, T., Crawshaw, L. I., Kasuga, M., Uchida, Y., Tokizawa, K., Nagashima, K., & Kanosue, K. (2012). Relative importance of different surface regions for thermal comfort in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 113(1), 63–76. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2406-9>
- Nicol, F., Humphreys, M., & Roaf, S. (2012). *Adaptive thermal comfort: Principles and practice*. Routledge. <http://dx.doi.org/10.4324/9780203123010>
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563–572. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(02)00006-3)
- Norme NBN EN 16798-1:2019.* (n.d.). https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-16798-1-2019_8687/
- Normes de construction WELL, BREEAM et LEED.* (n.d.). <https://www.idewe.be/fr/-/normes-de-construction-well-breeam-et-leed>
- Ortiz, M. A., Kurvers, S. R., & Bluysen, P. M. (2017). A review of comfort, health, and energy use: Understanding daily energy use and wellbeing for the development of a new approach to study comfort. *Energy and Buildings*, 152, 323–335. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.060>
- Parkinson, T., & de Dear, R. (2014). Thermal pleasure in built environments: Physiology of alliesthesia. *Building Research & Information*, 43(3), 288–301. <https://doi.org/10.1080/09613218.2015.989662>
- Parkinson, T., & de Dear, R. (2016). Thermal pleasure in built environments: Spatial alliesthesia from air movement. *Building Research & Information*, 45(3), 320–335. <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1140932>
- Parkinson, T., de Dear, R., & Candido, C. (2015). Thermal pleasure in built environments: Alliesthesia in different thermoregulatory zones. *Building Research & Information*

Information, 44(1), 20–33. <https://doi.org/10.1080/09613218.2015.1059653>

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>

Saini, J., Dutta, M., & Marques, G. (2020). A comprehensive review on indoor air quality monitoring systems for enhanced public health. *Sustainable Environment Research*, 30(1). <https://doi.org/10.1186/s42834-020-0047-y>

Samani, S. A., Rasid, S. Z. A., & Sofian, S. bt. (2015). Perceived level of personal control over the work environment and employee satisfaction and work performance. *Performance Improvement*, 54(9), 28–35. <https://doi.org/10.1002/pfi.21499>

Shahzad, S., Brennan, J., Theodossopoulos, D., Hughes, B., & Calautit, J. K. (2016). A study of the impact of individual thermal control on user comfort in the workplace: Norwegian cellular vs. British open plan offices. *Architectural Science Review*, 60(1), 49–61. <https://doi.org/10.1080/00038628.2016.1235544>

Song, W., Zhang, Z., Chen, Z., Wang, F., & Yang, B. (2022). Thermal comfort and energy performance of personal comfort systems (PCS): A systematic review and meta-analysis. *Energy and Buildings*, 256, 111747. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111747>

te Kulve, M., Schellen, L., Schlangen, L. J. M., & van Marken Lichtenbelt, W. D. (2015). The influence of light on thermal responses. *Acta Physiologica*, 216(2), 163–185. <https://doi.org/10.1111/apha.12552>

Température opérative. (n.d.). <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/temperature-operative.html?IDC=1521&IDD=8657>

van Hoof, J. (2008). Forty years of Fanger’s model of thermal comfort: Comfort for all? *Indoor Air*, 18(3), 182–201. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x>

van Marken Lichtenbelt, W. D., Pallubinsky, H., & te Kulve, M. (2018). Modulation of thermogenesis and metabolic health: A built environment perspective. *Obesity Reviews*, 19, 94–101. <https://doi.org/10.1111/obr.12789>

van Marken Lichtenbelt, W., Hanssen, M., Pallubinsky, H., Kingma, B., & Schellen, L. (2017). Healthy excursions outside the thermal comfort zone. *Building Research & Information*, 45(7), 819–827. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1307647>

Vêtements. (2015, October 14). <https://www.beswic.be/fr/themes/agents-physiques/ambiances-thermiques/vetements>

Wagner, A., Gossauer, E., Moosmann, C., Gropp, Th., & Leonhart, R. (2007). Thermal comfort and workplace occupant satisfaction—Results of field studies in German low energy office buildings. *Energy and Buildings*, 39(7), 758–769.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.013>

- Zhai, Y., Zhang, H., Zhang, Y., Pasut, W., Arens, E., & Meng, Q. (2013). Comfort under personally controlled air movement in warm and humid environments. *Building and Environment*, 65, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.022>
- Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C., & Han, T. (2010). Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort. *Building and Environment*, 45(2), 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.020>
- Zhang, H., Arens, E., Kim, D., Buchberger, E., Bauman, F., & Huizenga, C. (2010). Comfort, perceived air quality, and work performance in a low-power task–ambient conditioning system. *Building and Environment*, 45(1), 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.016>
- Zhang, H., Arens, E., Taub, M., Dickerhoff, D., Bauman, F., Fountain, M., Pasut, W., Fannon, D., Zhai, Y., & Pigman, M. (2015). Using footwarmers in offices for thermal comfort and energy savings. *Energy and Buildings*, 104, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.086>
- Zhang, H., Arens, E., & Zhai, Y. (2015). A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments. *Building and Environment*, 91, 15–41. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.013>
- Zhao, Y., Zhang, H., Arens, E. A., & Zhao, Q. (2014). Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part IV: Adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model. *Building and Environment*, 72, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.004>