

TFE 2021 [LBARC2200] – LOCI Bruxelles

Titre : Comment intégrer le confort thermique dans la conception architecturale, afin d'apporter du plaisir thermique aux occupants ? Architecture et plaisir thermique

Étudiant : CORBEEL Emile

Copromoteur-expert : WALLENBORN Grégoire

Copromoteur 2 : VAN MOESEKE Geoffrey

Copromoteur 3 : THIELEMANS Benoit

Copromoteur 4 : JUNGERS Jean-Jacques

Copromoteur 5 : MEYER Sandrine

Date de présentation : 18 juin 2020

Résumé

Une partie importante de l'énergie dépensée dans le secteur du bâtiment est utilisée pour maintenir un environnement intérieur confortable et ainsi garantir le confort thermique pour les occupants. De ce fait, l'architecture a tendance à séparer les climats extérieurs et intérieurs, et à maintenir une ambiance neutre identique à travers les saisons. Or, le confort dépend des attentes des occupants et de facteurs contextuels, et les gens n'ont donc pas les mêmes sensibilités. Dans ce travail, nous allons nous intéresser à la manière dont les concepteurs peuvent prendre en compte ces différences, à partir de l'hypothèse du confort adaptatif, selon laquelle les occupants interagissent avec le bâtiment pour minimiser leur inconfort thermique. Pour cela, nous allons reprendre dans la littérature scientifique des points pouvant aider l'architecte dans la conception thermique, et ainsi avoir une conception architecturale qui prend en compte le confort des occupants, leur procurant ainsi du plaisir thermique. Enfin, nous allons appliquer ces principes à un projet précis dans le cadre du contrat de quartier durable « Autour du Parc de l'Ouest », à Molenbeek-Saint-Jean.

Mots-clefs

Ambiance

Architecture durable

Conception architecturale

Confort thermique

Environnement

Ventilation naturelle

**Comment intégrer le confort thermique dans la conception architecturale,
afin d'apporter du plaisir thermique aux occupants ?**

Architecture et plaisir thermique

Emile Corbeel

Co-promoteurs: G. Van Moeseke,
B. Thielemans, S. Meyer, J-J. Jungers

Expert: Grégoire Wallenborn

*Travail de fin d'études en et sur l'architecture réalisé en vue de
l'obtention du titre de Master en architecture*

Année académique 2020-2021
UCLouvain – Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale,
d'urbanisme [Bruxelles]

Remerciements

Je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé et ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de fin d'études.

Mon promoteur principal, Geoffrey Van Moeseke qui m'a été d'une aide précieuse dans ma recherche, ainsi que mes trois autres co-promoteurs : Benoit Thielemans, Sandrine Meyer et Jean-Jacques Jungers, qui m'ont accompagné durant cette année, et qui m'ont guidé dans le projet.

Mon expert, Grégoire Wallenborn, avec qui j'ai pu avoir des discussions très intéressante autour de mon travail.

Je remercie également Juana Bastos, chef de projet du contrat de quartier durable « Autour du Parc de l'Ouest », qui m'a fourni des informations précieuses.

Tout le personnel de la maison des jeunes « Centrum West », en particulier Abdel.

Enfin, je remercie chaleureusement tout mon entourage, ma famille et mes amis pour m'avoir soutenu tout au long de ce travail, en particulier ma maman, qui m'a aidé à la relecture, et Martin Eeckhout.

Table des matières

Table des matières	4
Table des figures.....	5
0. Introduction.....	7
1. État de l’art.....	9
1.1. Énergie.....	9
1.2. Théories sur le confort thermique	9
1.2.1. Théorie traditionnelle PMV.....	9
1.2.2. Théorie du confort adaptatif de 1998 (de Dear & Bragger, Developing an Adaptive Model, 1998).....	11
1.3. Normes	13
1.4. Discussion	13
2. Méthode.....	14
3. Recherche.....	14
3.1. Avancements sur le confort thermique	14
3.1.1. Un examen de la recherche sur le confort thermique adaptatif depuis 1998 (de Dear, Xiong, Kim, & Cao, 2020).....	14
3.1.2. Catégorisation et hiérarchisation des adaptations (Liu, Yao, & McCloy, 2012).....	16
3.1.3. Thermal zoning during winter in super-insulated residential buildings (Selvnes, 2017)	17
3.2. Contrôle de l’ambiance	17
3.2.1. Études des actions des occupants.....	17
3.3. Actions sur le corps humain	19
3.3.1. Alliesthésie	19
3.3.2. Systèmes de confort personnel.....	21
3.4. Dimension socio-culturelle du confort thermique.....	24
3.4.1. Making « Sustainable consumption » matter : the indoor microclimate as an artifact (Sahakian, Rau, & Wallenborn, 2020)	24
3.4.2. Architecture et volupté thermique (Heschong, 1992)	25
3.5. Intégration dans le projet.....	26
.....	27
4. Résultats.....	28
4.1. Contexte du projet	28
.....	29
4.2. Centre de jeunesse.....	30
4.2.1. Intentions	30
4.2.2. Programme détaillé.....	31

4.3.	Environnement variable	35
4.3.1.	Simulations	35
4.3.1.1.	Halle non isolée	35
4.3.1.2.	Halle isolée	36
4.3.1.3.	Ateliers, bureaux et studio	38
4.3.2.	Résultats généraux	40
4.4.	Contrôle par les occupants.....	40
4.4.1.	Ventilation	40
4.4.2.	Zones	41
4.5.	Action personnelle	43
5.	Discussion des résultats	45
6.	Conclusion	46

Table des figures

Figure 1 : Métabolisme.....	10
Figure 2 : Habillement	10
Figure 3 : Humidité relative	10
Figure 4 : Vitesse de l'air	10
Figure 5 : Vote moyen prédit (PMV) ; Pourcentage de personnes insatisfaite (PPD).....	11
Figure 6 : Modèle statique PMV contre modèle adaptatif, pour des bâtiments avec systèmes de climatisation central contre bâtiments ventilés naturellement. (de Dear & Bragger, Developing an Adaptive Model, 1998).....	12
Figure 7 : Modèle appliqué à la norme utilisée actuellement en Belgique. Il explicite trois catégories de confort, selon les limites d'acceptabilité. (Carlucci, Bai, de Dear, & Yang, 2018).....	13
Figure 8 : Comparaison des plages de températures acceptables entre le modèle adaptatif « classique » et le modèle proposé pour les habitations. (de Dear, Kim, & Parkinson, 2018).....	15
Figure 9 : Méthode de processus hiérarchique analytique pour le confort thermique. (Liu, Yao, & McCloy, 2012).....	16
Figure 10 : Poids de chaque facteur et poids des trois catégories d'adaptation. (Liu, Yao, & McCloy, 2012).....	16
Figure 11 : «Modèle conceptuel qui associe les zones physiologiques de la thermorégulation aux adjectifs couramment utilisés pour décrire la perception thermique d'un environnement ». Modifié et traduit par l'auteur d'après Parkinson et de Dear (Parkinson & de Dear, 2015).....	20
Figure 12 : Sensibilité des différentes zones du corps.	22
Figure 13 : Plages de températures confortables fournies par PCS. (Zhang et al, 2015, fig. 5).....	23
Figure 14 : Catégorisations des leviers architecturaux en vue du confort thermique. Inspiré et adapté de (Liu, Yao, & McCloy, 2012).	26
Figure 15 : Carte du site - "Autour de Parc de l'Ouest"	27
Figure 16 : Axe doux JB Decock et Passerelle Beekkant.....	28
Figure 17 : Plan et élévation situation initiale, 1:200e.....	29
Figure 18 : Plan rez-de-chaussée et coupe, 1:200e.....	32

Figure 19 : Plan 1er étage et coupe, 1:200.....	34
Figure 20 : Courbe annuelle des températures pour la halle non isolée, du 21/12/2020 au 21/12/2021.	36
Figure 21 : Courbe annuelle des températures pour la halle isolée, du 21/12/2020 au 21/12/2021..	37
Figure 22 : Courbes des températures annuelles pour les zones isolées du bâtiment, du 21/12/2020 au 21/12/2021.....	39
Figure 23 : Courbes annuelles des températures, du 21/12/2020 au 21/12/2021.	40
Figure 24 : Opportunités adaptatives dans le projet	42
Figure 25 : Assise chauffante.....	43
Figure 26 : Système de ventilation mécanique	43
Figure 27 : Assise isolée et ventilation localisée	44

0. Introduction

Durant la formation d'architecte, nous explorons les moyens de créer et de manipuler l'espace. Or, nous manquons parfois de moyens pour objectiver cette conception, particulièrement du point de vue de l'efficacité écologique du bâtiment. De plus, on y aborde différentes manières de concevoir un projet d'architecture, qui peuvent parfois être contradictoires.

D'autre part, nous sommes depuis quelques années déjà dans une période où nous prenons conscience des problématiques essentielles qu'amène la réalité des changements climatiques. Notre génération semble particulièrement concernée, comme nous avons pu le voir lors des marches des jeunes pour le climat. Cela fait sens, puisque nous sommes la génération qui va plus encore que les adultes d'aujourd'hui, subir les effets du réchauffement climatique. Nous allons devoir y faire face. Cela, nous l'entendons de manière répétée dans notre formation, durant laquelle on nous rappelle souvent l'importance de la proportion d'émissions de CO₂ du secteur du bâtiment, et donc de l'architecture. On constate donc l'importance d'objectiver la conception durable des bâtiments, afin de parvenir à des solutions efficaces et appropriées.

Une dimension majeure de l'architecture écologique est la dépense d'énergie du secteur. Or, une partie importante de ces dépenses sert au chauffage des bâtiments. Suivant cette logique, les efforts faits en architecture servent à fournir un environnement intérieur confortable pour les occupants. D'un point de vue thermique, le but de l'architecture est donc d'abriter les occupants d'un climat extérieur défavorable, leur permettant de vivre dans les meilleures conditions possibles. À travers l'histoire de l'architecture, on observe que les modes de protection vis-à-vis de l'extérieur ont grandement évolué. Un des plus gros changements à eu lieu à l'apparition des systèmes de chauffage central. Avec cette nouvelle technologie, qui permet de chauffer tout l'espace intérieur, on a pu complètement séparer l'espace intérieur de l'espace extérieur, et cela a produit de nouvelles formes architecturales. Les fenêtres ont pu se développer librement, tandis que les capacités isolantes intrinsèques des matériaux avaient moins d'importance. Aujourd'hui, avec la conscience de la finitude des ressources et de la pollution liée à l'utilisation de celles-ci, les standards passifs sont apparus, dans le but de limiter le plus possible la consommation d'énergie du bâtiment, en recherchant un confort thermique uniquement en influant sur la température de la ventilation hygiénique. Cela a eu pour principal effet d'avoir une enveloppe fortement isolée et complètement étanche à l'air, et de créer des plages de température stables et restreintes pour atteindre un confort thermique neutre. L'intérieur du bâtiment passif a donc son propre climat, complètement séparé de l'extérieur.

Cependant, avoir une même plage de température dans tout le bâtiment n'est pas forcément une bonne chose. En effet, le confort optimal change avec les personnes, avec le milieu de vie, et avec le climat. Ainsi, une architecture en relation avec le climat extérieur peut être développée, pour apporter une autre approche du confort thermique. Ce domaine de recherche est déjà très développé, par exemple, par la théorie du confort thermique adaptatif (de Dear & Bragger, 1998). Celle-ci suggère que les occupants s'adaptent en permanence aux conditions thermiques, en fonction de différents paramètres. Cette approche suggère donc une plus grande plage de températures acceptable pour les occupants, dépendant du degré de contrôle possible sur le climat intérieur, et de l'environnement extérieur. De plus, cette théorie induit une notion de satisfaction vis-à-vis de l'ambiance, permise par un environnement variable.

Si la recherche sur le confort thermique est déjà très développée et continue de s'élargir, son application dans le domaine de l'architecture est peu courante, hors les aspects techniques comme les systèmes de climatisation, et encore moins mise en exergue. Cette division se reflète également sur la séparation des bureaux d'études et des bureaux d'architectes. La réflexion sur l'ambiance thermique

apparaît donc plus comme une contrainte. Or, cette réflexion ne devrait-elle pas plutôt être un moteur de conception ? En effet, le confort thermique étudié porte avant toute chose sur les personnes et, fondamentalement, objective notre rapport à l'atmosphère de l'espace architectural.

Dans son livre « Architecture et volupté thermique » (Heschong, 1992), Lisa Heschong parle du plaisir thermique en architecture, et explore les différentes façons dont l'aspect thermique de l'espace a pu influencer les humains dans leurs interactions entre eux, et avec l'architecture. La perception de la température de l'air ne serait pas la seule manière de percevoir l'ambiance d'un espace, et l'auteure souligne l'importance de tous les sens dans la perception thermique de l'environnement. La variabilité de l'ambiance est nécessaire pour percevoir les sensations thermiques. De plus, certaines pièces ou dispositifs architecturaux peuvent créer des climats localisés spécifiques. On peut donc selon Heschong considérer l'espace comme créateur d'ambiances. Philippe Rahm évoque également ce principe, et explore la création de certains espaces qui pourraient ne pas être affectés a priori à une fonction, mais que les occupants affecteraient au gré des climats spécifiques produits dans ces espaces (Rahm, 2016).

Ces approches de la conception d'un projet, le zonage, le confort adaptatif et la satisfaction thermique sont celles que nous allons explorer dans ce travail. La littérature scientifique étant déjà très développée, l'application et l'explicitation de ces principes dans l'architecture étant par contre limitées, nous allons rassembler certains de ces concepts, en nous basant sur la littérature scientifique, et en démontrant leur faisabilité dans la réalisation d'un projet.

Le but de notre travail sera donc d'intégrer le confort thermique dans la conception architecturale, afin d'apporter du plaisir thermique aux occupants. Nous allons rechercher comment ces principes peuvent influencer l'espace et ses occupations, et comment faire en sorte que le climat ait un rôle décisif positif pour les habitudes des utilisateurs. Pour cela, il faudra identifier dans une large littérature des principes d'action et leurs impacts sur les ambiances, identifier et comprendre les liens entre ambiance, comportement, satisfaction et enfin consommation d'énergie, pour les utiliser efficacement et pouvoir en tirer profit dès les premières phases du projet.

1. État de l'art

Afin de trouver les moyens de conception qui permettraient d'apporter du plaisir thermique aux occupants, nous allons d'abord situer le contexte de ce thème. Ici, l'objectif n'est pas de faire un inventaire des projets d'architecture sous le prisme du confort thermique, mais bien d'identifier les théories ou les normes qui le régissent, pour objectiver la conception thermique.

1.1. Énergie

Selon un rapport de l'IEA (International Energy Agency), le secteur du bâtiment était en 2017, responsable de près d'un tiers de la consommation d'énergie annuelle, et de près de 30% des émissions de CO₂ (IEA, 2019). Dans les pays de l'OCDE, le chauffage et la climatisation sont responsables d'environ la moitié de cette consommation (IEA, 2016). De plus, alors que suite au changement climatique, les températures maximums augmentent chaque année, la demande de refroidissement a doublé entre 2000 et 2017, et est celle des consommations finales des bâtiments (IEA, 2018) qui augmente le plus vite.

En outre, une large part des équipements de chauffage vendus à ce jour est dominée par les combustibles fossiles et les équipements électriques conventionnels, peu efficaces (IEA, 2020).

Ainsi, nous pouvons voir que pour diminuer notre consommation d'énergie, il est impératif, d'une part d'utiliser de meilleurs moyens de production de chaleur, et d'autre part de conserver l'énergie produite le plus efficacement possible. Nous devrions également nous demander s'il n'est pas judicieux de diminuer nos besoins personnels de chaleur, en réévaluant nos besoins de confort. C'est à cette question que répondent les travaux sur la théorie dite du « confort thermique ».

1.2. Théories sur le confort thermique

Autrefois, les préoccupations par rapport au confort thermique se concentraient sur la nécessité de se chauffer suffisamment selon les ressources disponibles, et de ne pas perdre la chaleur produite. Ainsi, le bâti servait d'abri à l'humain, et produisait un environnement suffisamment confortable pour que la vie puisse s'y dérouler. Avec l'apparition des techniques de chauffage modernes, et du moment que les ressources étaient disponibles et peu chères, la seule question était de savoir jusqu'où chauffer ou, dans certains cas, refroidir. Ainsi, le chauffage étant fait pour produire un environnement confortable pour les occupants ; il a alors fallu déterminer ce besoin de confort.

1.2.1. Théorie traditionnelle PMV

L'approche traditionnelle du confort thermique cherche à déterminer une atmosphère intérieure la plus acceptable possible, pour le plus de gens possible. Elle est basée sur un modèle datant de 1982 de P.O. Fanger, qui pose les bases du confort thermique (Fanger, 1986). Il établit alors ces **cinq paramètres** :

Le **métabolisme**, qui correspond à la production de chaleur du corps. Un taux de métabolisme standard, pour une activité de bureau ou résidentielle est de 1.2 met.

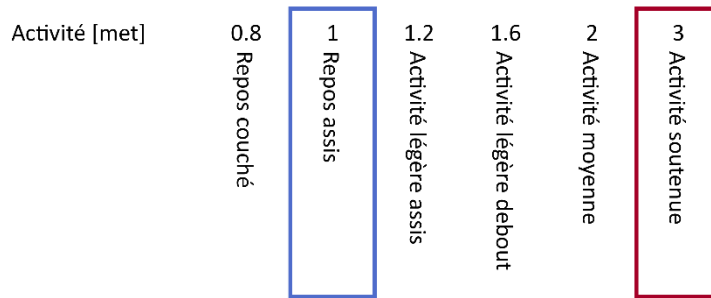


Figure 1 : Métabolisme

Le **niveau d'habillement**, qui agit comme un isolant entre le corps et l'extérieur.

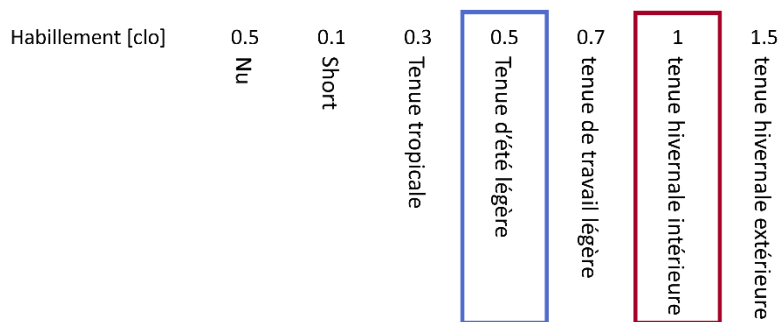


Figure 2 : Habillement

La **température opérative**, ou la température ressentie, obtenue en faisant la moyenne de la température de l'air et la température moyenne des parois ($T^{op} = (T^a + T^p)/2$). Cette valeur est valide pour une vitesse de l'air faible, de 0.2m/s.

L'**humidité relative de l'air**, soit la quantité d'eau retenue dans l'air à une certaine température.

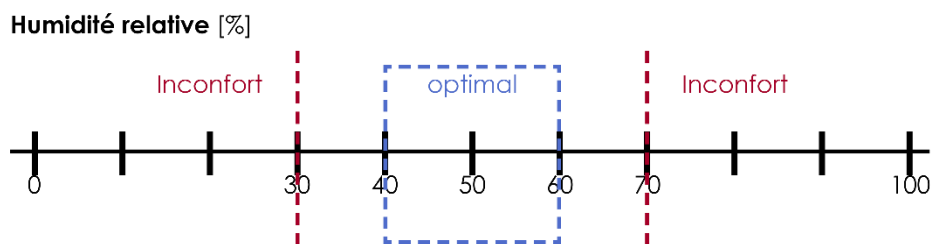


Figure 3 : Humidité relative

La **vitesse de l'air**, qui refroidit la peau par convection.

Vitesse de l'Air [m/s]	0.1	0.3	0.7	1	1.6	2.2	3	4.5	6.5
Reffroidissement équivalent [°C]	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Figure 4 : Vitesse de l'air

En prenant compte de ces paramètres, pour une situation donnée, on peut alors déterminer une plage de températures optimale, qui sera exprimée soit sur un graphique, soit par un indicateur donnant pour une situation donnée l'avis moyen d'un groupe de personnes. Cet indicateur est nommé **PMV** (predicted mean vote), soit le vote moyen prévisible. Il indique donc le taux de satisfaction vis-à-vis de l'ambiance, sur une échelle de -3 à 3. Ensuite, on en déduit un second indice, le **PPD** (predicted percentage dissatisfied), soit le pourcentage prévisible d'insatisfaits, qui exprime le pourcentage de personnes insatisfaites pour la situation donnée. (Energie Plus, 2007)

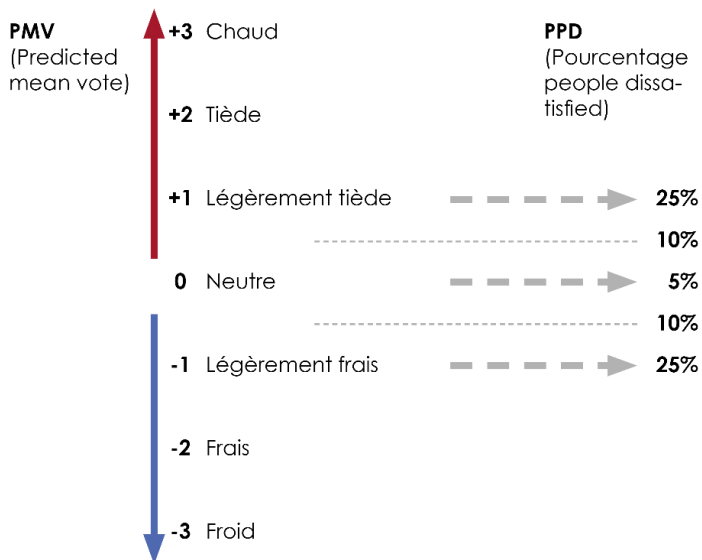


Figure 5 : Vote moyen prédit (PMV) ; Pourcentage de personnes insatisfaites (PPD)

Discussion autour de cette théorie

Cette méthode de prévision du confort thermique des occupants fonctionne bien pour un environnement intérieur contrôlé, avec des systèmes de chauffage et de ventilation centralisés, mais où les occupants ont une possibilité de contrôle limitée. Mais il s'agit d'un modèle statique. Car s'ils prennent en compte des paramètres adaptables comme l'habillement, le métabolisme ou la vitesse de l'air, ces paramètres sont fixes dans le temps et dans l'espace. Il en découle donc une plage de température très restreinte correspondant à des paramètres précis. Cette méthode de prévision du confort induit donc des techniques poussées et énergivores pour maintenir la température sous, ou au-dessus d'un seuil précis. Cependant, si on admet que ces paramètres peuvent évoluer au cours d'une période, les plages de températures acceptables pourraient être plus larges.

1.2.2. Théorie du confort adaptatif de 1998 (de Dear & Bragger, Developing an Adaptive Model, 1998)

À partir de la même période, des théories sont apparues selon lesquelles la satisfaction à l'environnement intérieur dépend du contexte, et des attentes vis-à-vis de celui-ci. Ainsi, pour prédire le confort thermique, il faudrait prendre en compte les adaptations possibles de l'occupant à l'environnement intérieur.

En 1998, de Dear et Brager ont donc développé un modèle adaptatif de confort thermique et de préférence. Selon cette théorie, les occupants interagissent avec le bâtiment pour minimiser leur inconfort thermique en s'adaptant à l'environnement.

Ils définissent donc trois types d'adaptation :

Adaptation physiologique : régulation thermique du corps, « changement dans les réponses physiologiques résultant de l'exposition à des facteurs environnementaux thermiques, entraînant une diminution progressive de la contrainte induite par cette exposition ». Elle se produit sur du long terme, soit par acclimatation sur une génération, soit par adaptation génétique, de génération en génération. (de Dear & Bragger, Developing an Adaptive Model, 1998).

Adaptation comportementale : modifications faites par quelqu'un, « qui modifie les flux de masses et de chaleur déterminant la balance thermique du corps ». Elles sont personnelles (enlever un habit, se mettre en activité, etc.), technologiques (chauffage, ventilation, etc.) et culturelles (faire la sieste quand il fait chaud, etc.). (de Dear & Bragger, Developing an Adaptive Model, 1998)

Adaptation psychologique : « perception altérée des informations sensorielles, et une réaction à celles-ci, due à des expériences et des attentes précédentes. ». Cette notion peut être comprise comme une habitude à certaines conditions, et donc un changement de perception. (de Dear & Bragger, Developing an Adaptive Model, 1998)

Ensuite, leur approche se base sur de nombreuses données issues d'études de terrain pour produire leur modèle adaptatif. Il est utile de noter que ces études sont principalement portées sur des immeubles de bureaux.

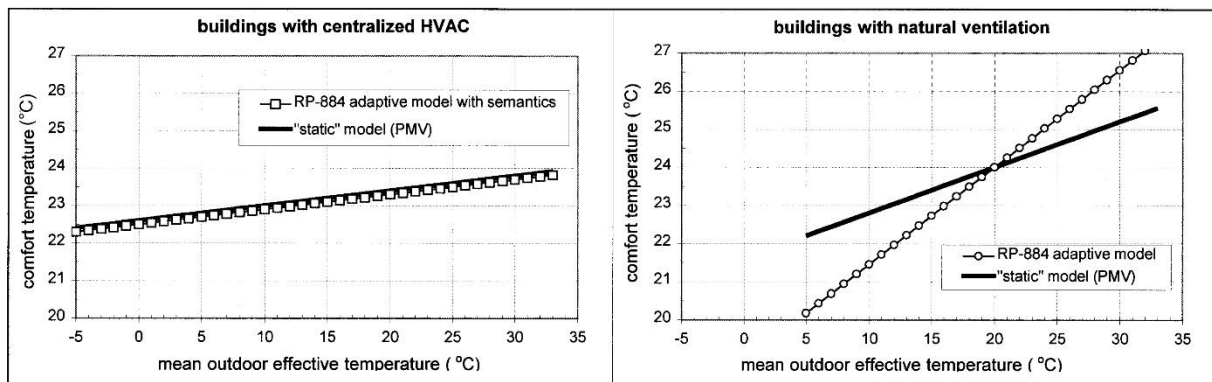


Figure 6 : Modèle statique PMV contre modèle adaptatif, pour des bâtiments avec systèmes de climatisation central contre bâtiments ventilés naturellement. (de Dear & Bragger, Developing an Adaptive Model, 1998)

Sur base des résultats, visibles sur la Figure 6, la première observation est que le niveau de neutralité thermique intérieure augmente quand le climat extérieur devient plus chaud. Ensuite, ils constatent une forte différence entre les plages de température acceptables avec le modèle statique PMV, et avec leur modèle adaptatif, pour des bâtiments avec un système de ventilation naturelle.

Environ 50% de la dépendance entre la température extérieure et la température intérieure serait expliquée par les ajustements comportementaux. Par exemple en hiver, quand le climat est froid, on s'habille plus chaudement et ces habits restent sur nous quand on est à l'intérieur. La résistance thermique reste donc élevée et on est moins sensible au froid. Le reste peut être expliqué par les adaptations psychologiques, à savoir les attentes et les habitudes. Ainsi, en été on s'attend à un intérieur plus chaud qu'en hiver.

Les auteurs constatent également un décalage entre le vote de sensation optimale, et la sensation neutre. En effet, la sensation préférée pour une personne pourrait être différente de la sensation neutre, à des conditions optimales. En été, on préfère avoir un peu plus froid que la température neutre, et en hiver un peu plus chaud.

L'étude en conclut que « le confort thermique est obtenu en faisant correctement correspondre les conditions thermiques intérieures et les attentes, en se basant sur les expériences antécédentes et les normes architecturales.¹ » (de Dear & Bragger, *Developing an Adaptive Model*, 1998). Le modèle adaptatif relie donc les températures intérieures acceptables aux conditions climatiques extérieures.

Les auteurs ajoutent que les conditions pour un environnement thermique confortable ventilé naturellement doivent être basées exclusivement sur l'approche du modèle adaptatif, pour les raisons évoquées ci-dessus de possibilité d'action de l'occupant sur l'environnement.

Pour un bâtiment laissant aux occupants des capacités d'adaptation, les plages de températures acceptables sont donc variables dans le temps et dans l'espace, en fonction du contexte et des attentes des occupants.

1.3. Normes

Plusieurs normes et réglementations ont découlé du modèle adaptatif : ASHRAE 55, EN 15251, ISO 7744, etc. Ainsi, le standard est appliqué dans les normes européennes, et les bâtiments à ventilation mixte (naturelle, et mécanique quand les conditions extérieures ne permettent pas un confort adaptatif suffisant) sont intégrés dans les modèles.

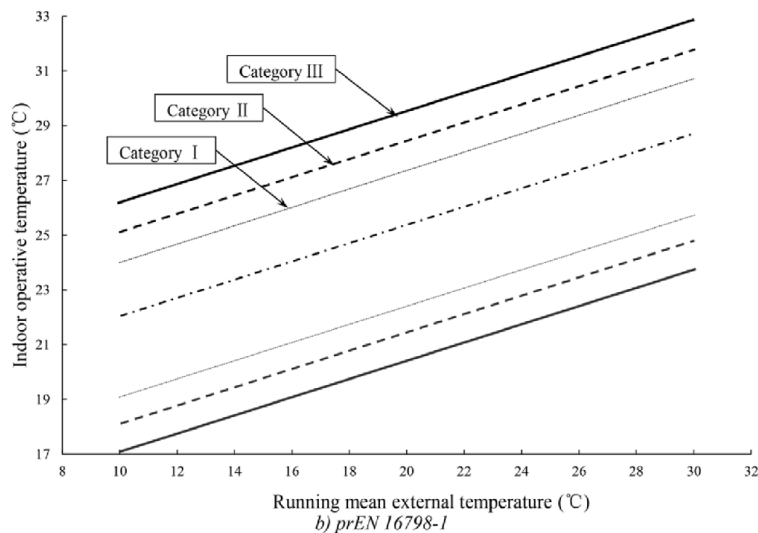


Figure 7 : Modèle appliqué à la norme utilisée actuellement en Belgique. Il explicite trois catégories de confort, selon les limites d'acceptabilité. (Carlucci, Bai, de Dear, & Yang, 2018)

1.4. Discussion

Les enjeux d'énergie actuels nous ont indiqué qu'il faut revoir nos pratiques et nos standards de confort thermique pour réduire notre consommation d'énergie. Les paramètres traditionnels du confort thermique induisent déjà les premières actions qui peuvent influencer notre confort. Finalement, la théorie du confort thermique adaptatif nous apprend que des plages de températures confortables plus larges sont possibles, moyennant l'existence d'opportunités adaptatives dans le bâtiment. Cette théorie fait apparaître la notion de sensation préférée non neutre, et donc le début d'une notion de plaisir thermique (de Dear & Bragger, 1998)

Nous avons donc pu voir, à travers les normes utilisées à ce jour, que la pratique architecturale se limite généralement à l'interprétation de ces théories pour déterminer le

¹ Traduit par l'auteur

confort thermique des occupants. Or, si elles indiquent une marche à suivre et que la théorie du confort adaptatif apporte un premier élément de réponse à notre question de recherche, des développements supplémentaires sont nécessaires.

2. Méthode

Après avoir vu comment est abordé le confort thermique dans le domaine de l'architecture, la méthode employée dans ce travail pour répondre à notre question de recherche sera d'explorer la littérature dans des domaines plus larges. Ainsi, nous allons nous intéresser à plusieurs sujets de recherche, traitant de la question du confort thermique sous plusieurs angles. Le but de cette démarche sera également de relier le confort thermique à des enjeux socio-culturels, afin de réaliser l'impact que peut avoir une conception en vue du plaisir thermique au-delà des notions de confort, sur les modes de vie et sur les habitudes de consommation d'énergie. En effet, le progrès écologique en architecture ne doit pas seulement concerner la technique, mais également la culture et la manière d'habiter les espaces.

Nous allons donc commencer par nous intéresser aux nombreux avancements faits autour de la théorie du confort adaptatif et des ambiances variables, puis nous aborderons le contrôle de l'environnement par les occupants et nous observerons sur les actions sur le corps humain. Finalement, nous nous intéresserons à la dimension sociale et culturelle du confort thermique.

De ces différents articles scientifiques, nous retirerons des principes de conception pour un projet architectural, que nous appliquerons alors sur un projet concret. Nous pourrons ainsi simuler son environnement thermique, et nous appuyer sur la littérature pour attester l'effet que peut avoir une telle conception sur les occupants.

3. Recherche

3.1. Avancements sur le confort thermique

3.1.1. Un examen de la recherche sur le confort thermique adaptatif depuis 1998 (de Dear, Xiong, Kim, & Cao, 2020)

La publication de 1998 (de Dear & Bragger, 1998) sur le confort thermique adaptatif a provoqué un essor de ce domaine de recherche. En 2020, cette revue de la littérature examine donc les principaux points de littérature ayant connu une évolution. Nous allons en examiner quelques-uns.

Recherche dans d'autres typologies de bâti

Comme vu précédemment, le confort ou l'inconfort thermique dépend des opportunités adaptatives disponibles. L'architecture a donc une grande influence sur le processus adaptatif des occupants en offrant des dispositifs d'adaptabilité, le plus communément des fenêtres permettant une ventilation naturelle. Un point important à prendre en compte si on se base sur la théorie de 1998 (de Dear & Bragger, 1998) est que leur modèle est basé sur des données de terrain, exclusivement pour des bureaux. Or, la disponibilité et la multiplicité des dispositifs adaptatifs pourrait varier entre différentes typologies de bâti, par des facteurs notamment culturels. Pour concevoir un projet autre que des bureaux, la norme de confort sera peut-être plus flexible.

Dans cette revue, deux typologies supplémentaires sont donc examinées.

Habitations : Par l'extension de la recherche dans des habitations, on constate premièrement que celles-ci offrent plus d'opportunités adaptatives que dans des bureaux.

Chez elles, les personnes peuvent modifier plus directement leur environnement (de Dear, Kim, & Parkinson, 2018), et ajuster plus librement leur niveau d'habillement/d'isolation personnelle (Kim, de Dear, Parkinson, & Candido, 2017) - (Yan, Mao, & Yang, 2017). De plus, les occupants tolèrent tant des plus grandes variations de température, que des températures plus faibles. La Figure 8 nous montre donc l'évolution du graphique pour les habitations.

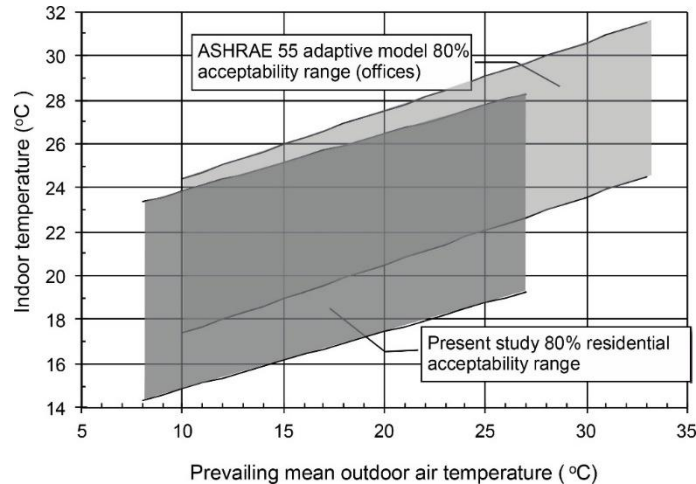


Figure 8 : Comparaison des plages de températures acceptables entre le modèle adaptatif « classique » et le modèle proposé pour les habitations. (de Dear, Kim, & Parkinson, 2018)

Écoles : Les bâtiments d'enseignement présentent également diverses opportunités adaptatives. Cependant, les enfants ne les exercent pas forcément, car ils pourraient devoir demander la permission de les utiliser au professeur (Bernardi & Kowaltowski, 2006). Cela dépend également de l'âge des élèves, les élèves plus âgés exprimant plus leur désir d'adaptation thermique (Kim & de Dear, 2018).

En outre, selon les études récentes, le consensus est que l'état thermique souhaité par les élèves se situe souvent en dehors de la zone de confort prescrite par les normes actuelles ; et qu'importe leur âge, la sensation optimale pour les étudiants serait atteinte dans des conditions plus fraîches que les adultes (Singh, et al.) ; (Zomorodian, Tahsildoost, & Hafezi, 2016).

Ainsi, pour concevoir un environnement intérieur confortable, il faudra prendre en compte le type de bâtiment, particulièrement le degré d'adaptabilité permis et le public cible des dispositifs adaptatifs.

Les zones de confort évoluent

Avec la progression des techniques et des normes sociales, les plages de températures qu'on trouve au sein des bâtiments ont également évolué. En effet, les limites des zones de confort sont devenues progressivement plus étroites au cours des décennies passées. Pour l'été, nous sommes passés d'une plage de 23.9 à 27.2°C en 1940-50, vers 23 à 26.1°C après 1981, soit une diminution de 1° ; en hiver, de 17.2 à 21.7°C en 1940-50, vers 20 à 24.5°C après 1981, soit une augmentation d'environ 3°C (pour des bureaux). (Yamamoto, Nishihara, Kawaguchi, Harigaya, & Tanabe, 2010)

Ensuite, on constate qu'une expérience thermique à long terme peut modifier les attentes de confort thermique. Ainsi, en étant exposé à un environnement intérieur chaud, notre capacité d'adaptation et donc notre confort pour des conditions plus froides est diminué (Ning,

Wang, & Ji, 2016). On remarque aussi qu'il est plus facile et plus rapide de renforcer ses attentes thermiques, mais plus difficile de les réduire.

Ce principe de zone de confort évolutive est intéressant, en conjonction avec le concept d'attentes thermiques, pour supposer qu'en mettant en place dans un bâtiment des ambiances plus « extrêmes » que la moyenne, les occupants vont petit à petit élargir leur zone de confort. Un bâtiment pourrait alors, par ses caractéristiques thermiques, influencer le confort dans un autre bâtiment.

3.1.2. Catégorisation et hiérarchisation des adaptations (Liu, Yao, & McCloy, 2012)

Comme nous l'avons vu, il existe dans la théorie du confort adaptatif trois grandes catégories d'adaptation : physiologique, comportementale et psychologique. Nous avons également vu que le modèle original était basé sur des analyses de bureaux.

Pour tenter de comprendre le fonctionnement du modèle au-delà d'un seul cadre bâti, une méthode a été développée pour pondérer les trois catégories du confort adaptatif. Celle-ci utilise un procédé analytique hiérarchique, en comparant des évaluations faites par les participants, afin de déterminer l'importance de chaque catégorie. Comme ces catégories fonctionnent elles-mêmes selon différents critères, l'étude a développé une structure hiérarchique en quatre niveaux, basés sur une analyse intensive de la littérature.

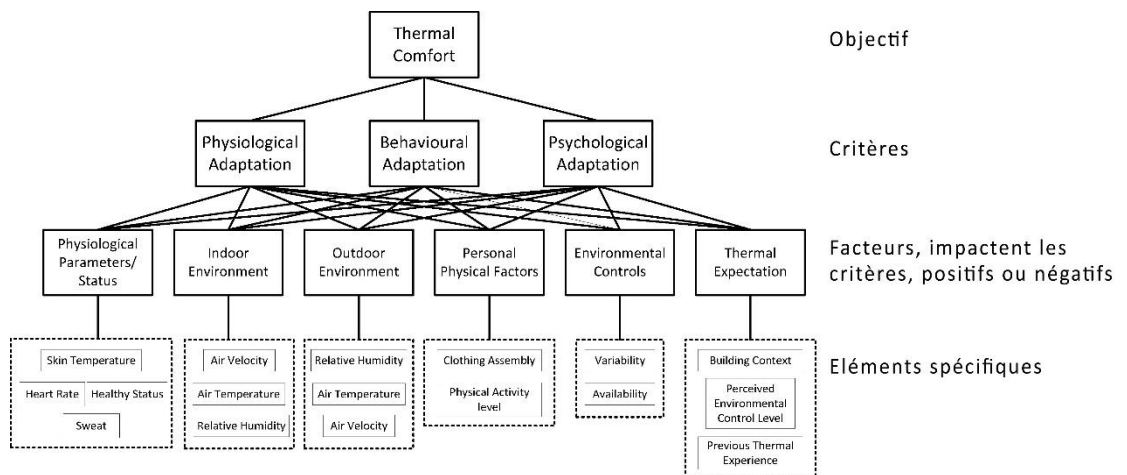


Figure 9 : Méthode de processus hiérarchique analytique pour le confort thermique. (Liu, Yao, & McCloy, 2012)

L'étude a porté sur deux localisations, en Chine et au Royaume-Uni, et on observe d'entrée de jeu que les résultats diffèrent entre les deux lieux. Ainsi, il apparaît clairement qu'un standard thermique adapté dépend de considérations locales ou sociales.

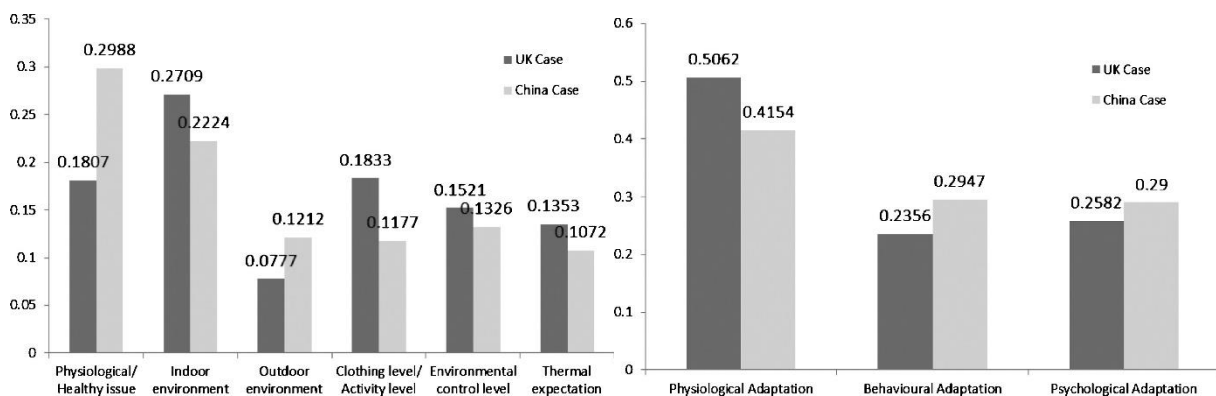


Figure 10 : Poids de chaque facteur et poids des trois catégories d'adaptation. (Liu, Yao, & McCloy, 2012)

Ensuite, nous pouvons voir dans les résultats que l'adaptation physiologique est le facteur le plus important en vue d'atteindre un confort thermique acceptable pour l'occupant. Par ailleurs, les résultats impliquent que fournir un environnement thermique approprié est le point clé pour garantir le confort thermique.

Si cette étude soutient que fournir un environnement contrôlé est le meilleur moyen d'atteindre le confort thermique, il semble -à priori- qu'elle omet par exemple l'impact de contrôles environnementaux sur l'environnement intérieur. Ainsi, cette méthode propose une hiérarchie stricte avec des liens limités entre les facteurs, qui pourrait être enrichie, non pas pour une analyse strictement hiérarchique, mais pour permettre une meilleure compréhension des opportunités adaptatives.

3.1.3. Thermal zoning during winter in super-insulated residential buildings (Selvnes, 2017)

Nous avons vu en étudiant le confort thermique adaptatif, que les environnements intérieurs gagnent à être variables, pour mieux répondre aux besoins des occupants. Nous allons donc nous intéresser à une étude faite sur le zonage thermique dans des maisons fortement isolées, par Eirik Selvnes, pour ensuite mieux appréhender son application.

L'objectif de cette thèse était, selon l'étudiant de master en ingénierie mécanique Eirik Selvnes, « d'étudier différentes stratégies permettant de créer différents niveaux de température à l'intérieur du bâtiment (en particulier dans les chambres) sans augmenter de manière significative les besoins en chauffage des locaux. » (Selvnes, 2017). En effet, un problème récurrent dans les maisons fortement isolées de Norvège est que dans les chambres, les occupants trouvent la température trop chaude et ouvrent donc les fenêtres pour compenser. Cela mène à une augmentation du besoin de chauffage du reste des espaces.

Le premier facteur majeur tiré de cette étude est la chaleur apportée par les gains internes et solaires, spécialement quand les températures extérieures sont plus douces (ici autour de 10 et 15°C). On pourrait donc en déduire qu'il faut augmenter les pertes de chaleur dans la zone à garder plus froide. Dans les simulations de l'auteur, la température de l'air apporté par la ventilation a une grande influence sur la température de la pièce. Limiter la température de débit pourrait donc être suffisant pour achever le zonage thermique.

Le second facteur qui entraîne une augmentation de la consommation d'énergie est le principe de ventilation en cascade, puisque l'air froid apporté dans les chambres finit par circuler et refroidir les autres pièces. Un point important est que la ventilation par les fenêtres n'était pas la source du problème, mais bien la chambre froide en elle-même. La solution examinée est d'avoir un système de ventilation indépendant pour les chambres, ce qui est spécialement efficace si les portes sont gardées fermées.

La conclusion de l'auteur est donc que les bâtiments devraient être plus résilients vis-à-vis des impacts négatifs des occupants, et devraient s'adapter à différents comportements. Ainsi, les principales solutions pour mettre en œuvre le zonage thermique seraient de limiter les gains de chaleurs, réduire l'isolation des zones "froides" tout en les isolant du reste du bâtiment, et enfin utiliser des systèmes de ventilation individuels par zone.

3.2. Contrôle de l'ambiance

3.2.1. Études des actions des occupants

Ci-avant, nous avons vu une catégorisation des opportunités adaptatives. Ici, nous allons nous pencher plus en détail sur le comportement des occupants vis-à-vis de ces opportunités.

Dans la littérature, on retrouve de nombreuses études sur le comportement des occupants, généralement dans le but de créer des modèles, pour ensuite modéliser les

comportements de bâtiments très précisément. Si l'objet de ce travail n'est pas de produire un modèle, ces études peuvent nous éclairer sur les paramètres entrant en compte, ou non, dans l'utilisation des dispositifs adaptatifs, pour ensuite nous guider vers des principes de conception.

Pour commencer, Obyn et Van Moeseke ont compilé de nombreux modèles comportementaux dont nous allons retrouver les points qui nous intéressent ci-dessous (Obyn & Van Moeseke, 2015).

Ventilation naturelle

La ventilation naturelle induit l'utilisation de fenêtres. Voici donc quelques principes pertinents pour notre recherche, pour identifier ce qui déclenche les actions et ainsi optimiser les dispositifs.

Les premiers résultats de l'analyse de la littérature montrent que l'ouverture des fenêtres est fortement liée au climat extérieur. Ainsi, dans la plupart des pays européens, les occupants ouvrent les fenêtres à partir d'une température extérieure de 10°C. De plus, les petites fenêtres ne sont pas uniquement utilisées pour la climatisation, mais aussi pour garantir une bonne qualité de l'air intérieur. Finalement, les occupants les plus proches d'une fenêtre auront plus de probabilité de l'utiliser, et rapportent donc moins d'inconfort que ceux pouvant moins facilement l'actionner.

Ensuite, Herkel et ses partenaires (Herkel, Knapp, & Pfafferot, 2008) déterminent les hypothèses suivantes : « Le pourcentage de fenêtres ouvertes, les heures d'ouverture et la fréquence d'ouverture ou de fermeture des fenêtres dépendent, selon diverses études, de (...)

La température intérieure : lorsque la température intérieure dépasse une certaine valeur, le pourcentage de fenêtres ouvertes augmente rapidement jusqu'à ce qu'un pourcentage de 100% soit atteint.

Le moment de la journée : pendant la nuit, le pourcentage de fenêtres complètement ouvertes est proche de zéro. Le pourcentage de fenêtres inclinées ouvertes varie à peine entre le jour et la nuit.

La présence : l'utilisation de fenêtres se produit principalement lorsque les occupants arrivent ou quittent leur poste de travail. Les fenêtres ouvertes sont fermées principalement à la fin d'une journée de travail. » (Obyn & Van Moeseke, 2015) qui eux même citent (Herkel, Knapp, & Pfafferot, 2008)).

Sur cette base, nous pouvons voir que le facteur le plus déterminant pour l'ouverture des fenêtres est la température extérieure. Aussi, la taille des fenêtres (petites, grandes, inclinées) va influencer l'action. Ce dernier principe appelle donc à varier la taille des ouvertures dans le projet, car des petites fenêtres vont être plus facilement ouvertes et vont avoir un impact minimisé sur le climat intérieur, tout en apportant un mouvement d'air frais proche de l'occupant.

Protections solaires

Les modèles portant sur l'utilisation des protections solaires sont généralement relativement similaires à ceux portant sur les fenêtres. Cependant, ils diffèrent sur quelques points clés.

Premièrement, l'utilisation de stores semble dépendre plus de l'éclairement extérieur, donc d'un inconfort visuel dû à l'éblouissement, plutôt que de la température extérieure. Cependant, « l'utilisation des protections solaires peut être accru par temps chaud » (Obyn &

Van Moeseke, 2015)._Ensuite, la variation de position -et donc d'utilisation- d'un store est faible par rapport à une fenêtre, et des utilisations quotidiennes seraient plus rares.

D'un autre côté, les protections solaires pourraient avoir un aspect pédagogique, pour apprendre le comportement thermique du bâtiment. En effet, les actionner impacte directement les gains solaires et la perception de chaleur par rayonnement.

Ventilateurs

Bien que l'utilisation observée des ventilateurs soit relativement faible, « les ventilateurs jouent un rôle important dans la réduction du stress thermique dans les bâtiments à ventilation naturelle en augmentant la circulation d'air. Par ailleurs, le taux d'utilisation des ventilateurs présente une forte corrélation avec les températures intérieure et extérieure et la sensation thermique, avec des coefficients de corrélation comparables à ceux obtenus pour l'ouverture des fenêtres » (Obyn & Van Moeseke, 2015). Ainsi, ils ont peu d'impact sur la température globale d'un local, mais apportent des stimuli locaux aux occupants, provoquant un effet de refroidissement qui améliore la sensation thermique personnelle.

Finalement, Nicol et Humphreys suggèrent dans leurs études (Nicol J. , 2001) (Nicol & Humphreys, 2004) une différence de disponibilité des ventilateurs entre pays, ce qui pourrait expliquer leur faible utilisation dans le cadre de l'enquête européenne. Or, s'ils étaient d'avantage mis en œuvre, leur utilisation serait assurée (Obyn & Van Moeseke, 2015). Pour compléter ce raisonnement, l'utilisation des ventilateurs augmente avec les températures extérieures, et est quasi universelle pour des températures supérieures à 30°C. Ainsi, si l'utilisation de ventilateurs n'est pas très répandue dans nos régions, leur intégration dans la conception architecturale aurait un impact majeur sur le confort des occupants.

Une seconde étude sur les comportements (Marín-Restrepo, Trebilcock, & Gillott, 2020) atteste que la probabilité qu'une action soit faite dépend de facteurs humains et spatiaux. En effet, dans les espaces partagés, il y a moins d'occupants actifs et ceux qui interagissent avec des éléments dépendent de leur perception d'une opportunité. De plus, au plus proche un occupant est d'un élément, au plus il est susceptible d'interagir avec celui-ci.

Ces deux études, la première étant elle-même une compilation d'autres études, montrent que dans un bâtiment ventilé naturellement, l'utilisation faite des opportunités adaptatives dépend des conditions environnementales, et de la position de celles-ci par rapport aux occupants. Cela nous montre l'importance de cette dimension pour la conception architecturale. Cependant, nous pouvons également voir qu'au-delà d'un certain seuil de températures, la plupart des opportunités adaptatives sont utilisées à leur maximum. De plus, nous pouvons observer que les fenêtres ont tendances à être fermées la nuit, ce qui est un point d'attention dans le cas où une ventilation de nuit est envisagée.

3.3. Actions sur le corps humain

3.3.1. Alliesthésie

Nous avons vu différents paramètres du confort thermique adaptatif. Nous pouvons maintenant nous demander pourquoi sont-ils si efficaces pour apporter de la satisfaction aux utilisateurs vis-à-vis d'un certain environnement dans un bâtiment ventilé naturellement, là ou un bâtiment avec des systèmes centraux de chauffage et de ventilation échouerait à apporter de la satisfaction, pour le même environnement ?

Selon Richard de Dear, cela peut être expliqué par l'alliesthésie : « Le phénomène d'alliesthésie est utilisé pour différencier le plaisir thermique de la neutralité thermique et de

l'acceptabilité. » (de Dear R. , 2011). Ce phénomène est donc utilisé pour comprendre les mécanismes de perception de l'humain sur son environnement thermique, et pour comprendre pourquoi certaines combinaisons environnementales sont perçues comme confortables (plus chaud mais vitesse de l'air plus élevée, etc).

Ainsi, de Dear synthétise le concept d'alliesthésie comme ceci: « any external or environmental stimulus that has the prospect of restoring the regulated variable within the milieu interieur to its set-point will be perceived as pleasant (positive alliesthesia), while any environmental stimulus that will further displace the error between the regulated variable and its set-point will be perceived as distinctly unpleasant, or even noxious in more extreme cases (negative alliesthesia). Alliesthesia leads us to seek pleasant stimuli and avoid unpleasant ones. » (de Dear R. , 2011). Autrement dit, si nous sommes par exemple dans un milieu nous faisant ressentir du froid, et qu'un stimulus externe nous apporte de la chaleur, ce stimulus sera perçu comme agréable. De plus, le plaisir n'apparaît que dans les états de transition. Quand le sujet revient à un état normal, le stimulus perd son facteur de plaisir et devient indifférent. (de Dear R. , 2011).

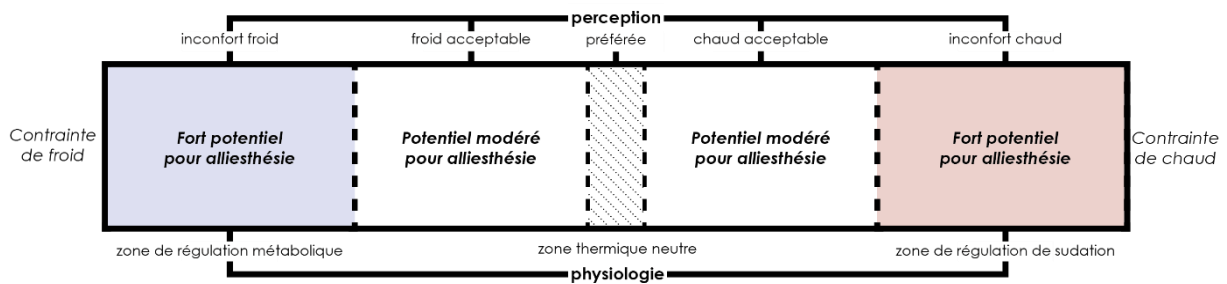


Figure 11 : «Modèle conceptuel qui associe les zones physiologiques de la thermorégulation aux adjectifs couramment utilisés pour décrire la perception thermique d'un environnement ». Modifié et traduit par l'auteur d'après Parkinson et de Dear (Parkinson & de Dear, 2015)

Pour le corps humain, la peau est un excellent vecteur de plaisir thermique. En effet, elle est la première exposée aux changements thermiques, et agit comme un indicateur sensoriel qui peut anticiper l'état thermique du corps (Schlader, Stannard, & Mundel, 2010). De plus, les récepteurs cutanés de froids sont plus proches de la surface de la peau que ceux de chaud (de Dear R. , 2011), ce qui explique que nous sommes à priori plus sensibles au froid.

En outre, la satisfaction et le plaisir thermique sont plus importants si le stimulus est localisé (sur une seule région du corps), que s'il est généralisé sur le corps entier (Arens, Zhang, & Huizenga, 2006). La satisfaction dépend également de la zone en question. Par exemple, le refroidissement du visage est le plus confortable, alors que le réchauffement de celui-ci est le moins confortable. Tandis que le réchauffement de la poitrine et de l'abdomen est très confortable, et a de forts effets d'alliesthésie (Nakamura, et al., 2008).

L'étude de Richard de Dear explique également que refroidir la peau par convection grâce à un mouvement d'air est un moyen idéal pour atteindre l'alliesthésie dans un milieu chaud et humide. La réchauffer par rayonnement est tout aussi idéal, pour des milieux froids.

En conclusion de l'article, de Dear cite l'étude d'Arens *et al.* : « ... people perceived neutral conditions as comfortable, but not as 'very comfortable'. The 'very comfortable' votes happened only in asymmetrical environments, when the local cooling/ heating helps remove some level of whole body thermal stress, and/or during transients, in which comfort perception anticipates and overshoots the coincident skin temperature. These results suggest a possible new perspective on environmental asymmetries and transients, where one might encourage them rather than to avoid them as sources of discomfort. It might be feasible to achieve higher levels of thermal comfort or pleasure than are currently possible, through

appropriately designed asymmetrical and transient thermal environments. » (Arens, Zhang, & Huizenga, 2006, p. 66)

L'alliesthésie peut donc être favorisée par l'architecture, en concevant des espaces à atmosphères variables et ventilés naturellement. Les transferts de chaleurs cités plus haut peuvent être utilisés pour offrir aux occupants des expériences thermiques plus agréables que celles obtenues par l'approche isotherme et statique (de Dear R. , 2011).

L'alliesthésie peut également avoir une dimension spatiale. En effet, elle implique d'avoir un environnement variable et non neutre, pour exploiter au mieux les rythmes naturels du climat. Pour cela, le concepteur doit réfléchir « à la façon dont les variations de la chaleur corporelle peuvent être manipulées pour stimuler l'alliesthésie thermique dynamique. » (de Dear R. , 2011). de Dear cite alors un passage de l'ouvrage de Lisa Heschong : "A parallel might be drawn to the provision of our nutrition needs. Food is as basic to our survival as is our thermal environment. ... It is ... theoretically possible to provide all of our nutritional needs with a few pills and injections. However ... no one would overlook the fact that it also plays a profound role in the cultural life of people. A few tubes of an astronaut's nutritious goop are no substitute for a gourmet meal. ... They are disconnected from all the customs that have developed around eating. ... The thermal environment also has the potential for such sensuality, cultural roles, and symbolism that need not, indeed should not be designed out of existence in the name of a thermally neutral world." (Heschong, Thermal Delight in Architecture, 1979, p. 17).

3.3.2. Systèmes de confort personnel

Nous avons donc vu les théories du confort thermique adaptatif, jusqu'à l'exposition du mécanisme de perception qui pourrait expliquer pourquoi cette théorie fonctionne si bien pour créer un environnement confortable. Comme le suggérait la recherche sur l'alliesthésie, nous allons maintenant voir les moyens pouvant être mis en œuvre pour agir localement sur les personnes. Ainsi, nous allons examiner ici une revue de la littérature sur les appareils de confort personnel (Zhang, Arens, & Zhai, 2015)

Selon Zhang et ses partenaires, un système de confort personnel est un « système qui chauffe ou refroidit un occupant personnellement, appelé 'personal comfort system' (PCS) »² (Zhang, Arens, & Zhai, 2015). Pour évaluer l'efficacité des différents systèmes repris, l'étude utilise le CP, ou pouvoir correctif, défini comme la différence entre deux températures ambiantes auxquelles une même sensation thermique est atteinte. Ici, il est noté en Kelvin.

Un premier point est fait pour préciser que les études sur les PCS ignorent généralement les systèmes traditionnels complexes comme les feux ouverts ou les fenêtres, en raison de la difficulté d'analyse avec les méthodes d'aujourd'hui. Mais cet examen de la littérature peut servir de base pour analyser la variété des systèmes dans les bâtiments à ventilation naturelle.

Il faut également noter que les occupants ne sont pas forcément statiques dans une zone. De ce fait, si un PCS est localisé, on montre que les occupants sont assez tolérants aux excursions thermiques et que l'environnement du poste de travail domine leur perception du confort (Zhang, Arens, & Zhai, 2015) .

Ensuite, Zhang et ses partenaires se basent sur plusieurs modèles de confort thermique qui, comme expliqué précédemment pour l'alliesthésie, étudient les sensations thermiques sur différentes zones du corps (Zhang, Arens, Huizenga, & Han, 2010, pp. 380-388) (Zhang, Arens, Huizenga, & Han, 2010, pp. 389-398) (Zhang, Arens, Huizenga, & Han, 2010, pp. 399-

² traduit par l'auteur

410) (Zhao, Zhang, Arens, & Zhao, 2014) . « Les PCS doivent être conçus de manière à cibler les segments du corps les plus inconfortables. Le refroidissement de la tête et du haut du corps est efficace dans les environnements chauds et neutres. Le réchauffement des pieds et du bas du corps est efficace dans les environnements froids. Le torse peut être chauffé ou refroidi. Il dispose d'une surface relativement importante pour le transfert de la chaleur vers le centre du corps, mais il est sensible aux grands gradients de température, surtout en cas de refroidissement. Les mains/poignets peuvent également être chauffés ou refroidis. Leur surface ne permet pas un transfert de chaleur important, mais la prévention de la vasoconstriction dans le froid est importante pour le maintien du confort général. »³ (Zhang, Arens, & Zhai, 2015). Pensez-y, on met une couverture sur ses jambes quand on a froid, et on dirige le ventilateur vers le torse et la tête quand on a chaud.

Quant aux manières d'agir sur le corps, « les PCS utilisent la radiation et le contact avec des surfaces chaudes pour réchauffer le corps ; et des mouvements d'air et du contact avec des surfaces froides pour refroidir le corps. Le chauffage par convection n'est pas efficace car le mouvement d'air, bien qu'il transfère de la chaleur vers la peau, augmente les pertes de chaleur par évaporation. » (Zhang, Arens, & Zhai, 2015)⁴

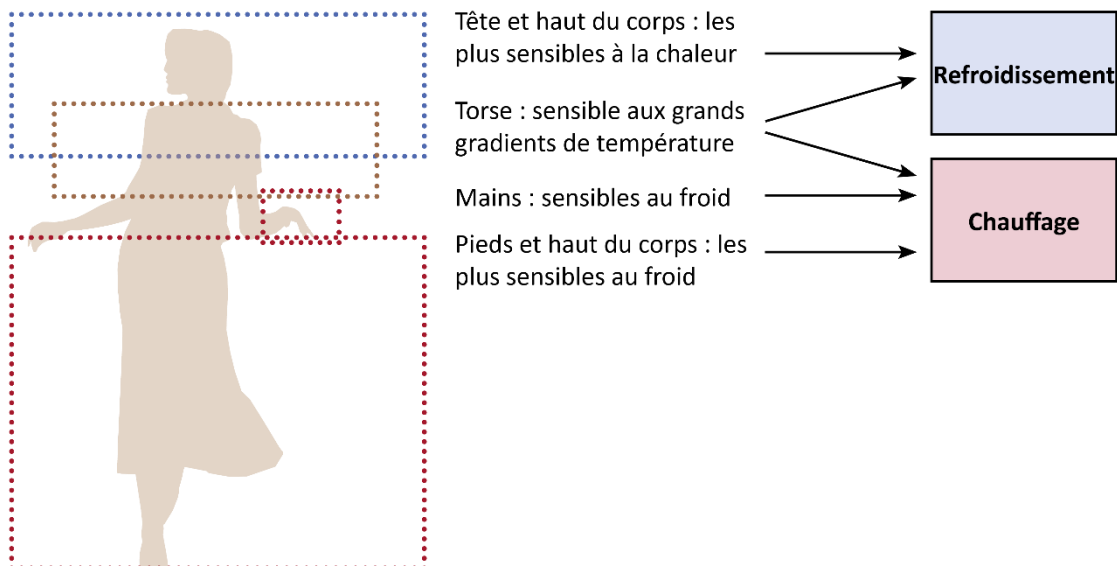


Figure 12 : Sensibilité des différentes zones du corps.

Types de PCS ; résultats (dans des conditions stables) :

Refroidissement par jet d'air frontal (ventilateurs, jet d'air) :

Température Ambiante	Vitesse de l'air nécessaire	Pouvoir correctif (CP)	Température ressentie	Sensation (PMV)
26 – 27 °C	0.36 à 0.6 m/s	-1K à -3K	23 à 26 °C	
28 °C	0.4 à 0.6 m/s	-2K à -3K	25 à 26 °C	±0.5
30 °C	0.8 à 1 m/s	-2K à -4K	26 à 28 °C	±0.5 / ±0.1
32 °C	Jusqu'à 2 m/s nécessaire pour maintenir le confort			
> 32 °C	Refroidissement de l'air nécessaire			

³ Traduit par l'auteur

⁴ idem

Tableau 1 : Refroidissement par jet d'air frontal.

Ventilateurs de plafond et flux d'air uniformes (ouvertures et unités de ventilation) :

Température Ambiante	Vitesse de l'air nécessaire	Pouvoir correctif (CP)	Température ressentie	Sensation (PMV)
26 – 27 °C	0.25 à 0.6 m/s	-3K	23 à 24 °C	
28 °C		Jusqu'à -4K		
-	1 m/s	-4K à -7K		

Tableau 2 : Ventilateurs de plafond et flux d'air uniformes.

Le ventilateur de plafond permet le confort jusqu'à 33°C. La plus haute température ambiante testée avec un flux d'air uniforme est de 31.5°C, à 80% d'humidité relative.

Chauffage/refroidissement par une chaise, ou chauffage des jambes ou des pieds :

1. Chaises froides : CP = -2K à -5K.
2. Chaises chaudes : CP = 7K à 10K.
3. Pieds/jambes/poignets chauds : CP = 2K (étude de terrain) à 6K (étude en laboratoire)

Compte tenu des résultats que nous venons de voir, dans certaines études, les taux de satisfaction sont plus haut avec les PCS que sans, pour les mêmes conditions. Cela pourrait être expliqué par l'alliesthésie, dans laquelle le confort dans des environnements non uniformes est meilleur que dans des environnements neutres uniformes sans systèmes personnels (Zhang, Arens, & Zhai, 2015)

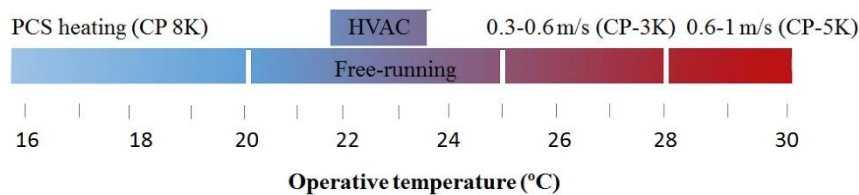


Figure 13 : Plages de températures confortables fournies par PCS. (Zhang et al, 2015, fig. 5)

Pour finir, les auteurs de cette revue ajoutent un point sur les bâtiments ventilés naturellement, dans lesquels la vitesse de l'air est souvent en dessous de 0.2 m/s. Ce qui selon les résultats exposés est très faible, pour avoir un pouvoir correcteur important. Or, les sensations thermiques mesurées dans ces bâtiments pourraient témoigner d'un pouvoir correcteur plus important que ne le justifierait cette vitesse (Zhang, Arens, & Zhai, 2015). Les auteurs expliquent donc que l'alliesthésie pourrait constituer une partie de la réponse. « The indoor air speed in NV buildings⁵ typically fluctuates at low frequencies, perceived as intermittent gusts. Comfort perception may be more influenced by the resulting dynamic changes in rate of cooling than by the steady cooling at average speed, producing a transient form of alliesthesia. » (Zhang, Arens, & Zhai, 2015). L'aération par les fenêtres permet donc une forme d'alliesthésie, par le changement dynamique des flux d'air naturels.

L'intégration de systèmes de confort personnels dans l'architecture du bâtiment a le potentiel de significativement améliorer le confort thermique des occupants, tout en permettant un élargissement des températures ambiantes intérieures acceptables. De plus, ces systèmes activent l'alliesthésie chez l'utilisateur, et procurent donc du plaisir thermique.

⁵ Bâtiments ventilés naturellement.

Si un bon nombre des systèmes existants sont actuellement indépendants du bâtiment, comme des chaises chauffantes ou des ventilateurs de bureaux, leur logique de fonctionnement peut être reprise et intégrée à l'architecture, en dessinant ces systèmes sur mesure. D'autant plus que, comme nous l'avons vu avec les fenêtres, les changements dynamiques de stimuli d'un système induit une forme transitoire d'alliesthésie, qui enrichit alors leurs effets.

3.4. Dimension socio-culturelle du confort thermique

Après avoir fait une analyse subjective de la littérature autour du confort thermique, et identifié des moyens d'agir sur celui-ci, il est intéressant de se pencher sur les effets que peut avoir une manipulation des atmosphères et du climat intérieur, sur la vie des occupants, et au-delà.

3.4.1. Making « Sustainable consumption » matter : the indoor microclimate as an artifact (Sahakian, Rau, & Wallenborn, 2020)

Sur base d'une expérience de terrain qui encourageait les foyers à réduire la température intérieure à 18°C, cette étude développe le concept d'un « microclimat intérieur comme un artefact ». En rendant ce climat intérieur tangible, on peut observer et décrire la relation que les habitants ont avec celui-ci. En traitant le climat intérieur comme un objet de consommation, de nouvelles pratiques durables de consommation d'énergie peuvent émerger. Les auteurs proposent ce concept pour aider leurs analyses : « we propose the concept of an indoor microclimate, defined as a combination of temperature, humidity levels, airflow and thermal comfort, as a cultural artifact that can be subjected to practice-oriented social-scientific scrutiny. » (Sahakian, Rau, & Wallenborn, 2020). La nouveauté est ici l'introduction d'une dimension culturelle du climat intérieur.

L'étude part du postulat qu'une habitation chauffée permet une série de pratiques comme partager un repas ou dormir confortablement. L'approche de l'étude permet donc d'observer comment ces activités se déroulent dans un certain climat, et quels impacts elles ont sur la consommation.

Les résultats de cette étude montrent premièrement que différentes personnes interagissent différemment avec le climat intérieur. Deuxièmement, le microclimat comme artefact permet aux occupants d'adapter leurs activités à l'atmosphère d'un certain lieu. Il n'y a ainsi pas de température « normale » adaptée à un « corps standard » ou à une certaine activité dans la maison. Troisièmement, l'étude révèle que des pratiques domestiques peuvent avoir de l'influence sur d'autres activités plus publiques. Ainsi, un artefact est comparé à un autre, montrant qu'une nouvelle notion de confort à un endroit particulier influence la perception d'autres climats. Cela peut avoir des effets de contagion positifs ou négatifs, en réduisant sa consommation dans d'autres lieux, ou en l'augmentant pour compenser les faibles températures du foyer.

Enfin, la notion de « microclimat comme consommable » montre tous les acteurs différents du microclimat intérieur, comme les propriétaires du bien, les fournisseurs d'énergie ou encore les architectes et les ingénieurs. Ainsi, tous ces acteurs sont concernés par la prise de contrôle des occupants sur leur confort thermique. « The indoor microclimate can thus become political, in that it is no longer invisible as an "energy service." » (Sahakian, Rau, & Wallenborn, 2020)

En conclusion de cet article, nous pouvons voir que rendre le microclimat intérieur visible en réduisant la température, peut créer des interactions sociales en relation avec le confort thermique, et ainsi produire des formes plus durables de consommation d'énergie.

3.4.2. Architecture et volupté thermique (Heschong, 1992)

Dans le livre de Lisa Heschong « architecture et volupté thermique », nous retrouvons l'idée d'associer des sensations thermiques à l'espace qui nous entoure. En effet, elle explique que nos sens ne sont pas isolés et fonctionnent ensemble, pour une meilleure expérience sensorielle. Par exemple, un carillon qui oscille au vent ou le bruit d'une fontaine, nous évoque la fraîcheur. (p. 45)

Or, dans un intérieur avec une température ambiante constante, et où les équipements assurant celle-ci sont cachés, le confort thermique va de soi, et devient alors abstrait. Heschong ajoute qu'« il nous est également difficile d'apparenter notre bien-être thermique à un objet ou à un lieu précis sans que nous ayons conscience, à quelque niveau que ce soit, de la fonction thermique qu'il assure » (p. 56). Ainsi, pour pouvoir associer le confort thermique à l'espace architectural, les fonctions assurant ce confort doivent être identifiables. De tels lieux peuvent être par exemple le coin-feu, la loggia ou la marquise. (p. 61)

Enfin, Heschong nous dit que « dans beaucoup de cultures, les espaces à vocation thermique jouent un rôle majeur en tant que décors que l'on identifie à la cohésion de la famille, du clan ou de tout autre groupe social. Les conditions thermiques singulières donnent une raison au groupe pour se rassembler. » (p. 66). De plus, « l'association du confort thermique à des individus et des espaces est consolidée par le rituel d'occupation des lieux. Occuper un espace à un moment donné et selon un mode spécifique, comme les Japonais prennent leur bain, crée une constance tout aussi bien fondée que le lieu lui-même. Cela établit sur le temps et le comportement une définition du lieu aussi forte que n'importe quelle définition architecturale de l'espace, tout comme un édifice pourrait le faire. L'occupation rituelle peut faire beaucoup plus que simplement renforcer l'affection que nous éprouvons pour un lieu. Au-delà du rituel, le lieu devient un élément essentiel des coutumes d'un peuple. » (p. 69)

3.5. Intégration dans le projet

Pour apporter du plaisir thermique par la conception architecturale du projet, il faudra donc premièrement concevoir des ambiances intérieures variables dans le temps et l'espace. Pour cela, il faudra déterminer quel niveau d'effort doit être fait pour l'isolation d'un espace, et quel niveau d'action peut avoir un effet sur le climat intérieur. Deuxièmement, pour assurer la satisfaction des occupants, il faudra leur donner le contrôle des actions sur le climat. Finalement, les systèmes de confort devront agir individuellement sur les personnes, et sur des zones précises du corps, pour activer l'alliesthésie et ainsi apporter du plaisir thermique aux occupants.

Le schéma ci-dessous catégorise les opportunités d'adaptation pour le confort thermique adaptatif, et les leviers architecturaux à exploiter dans le projet.

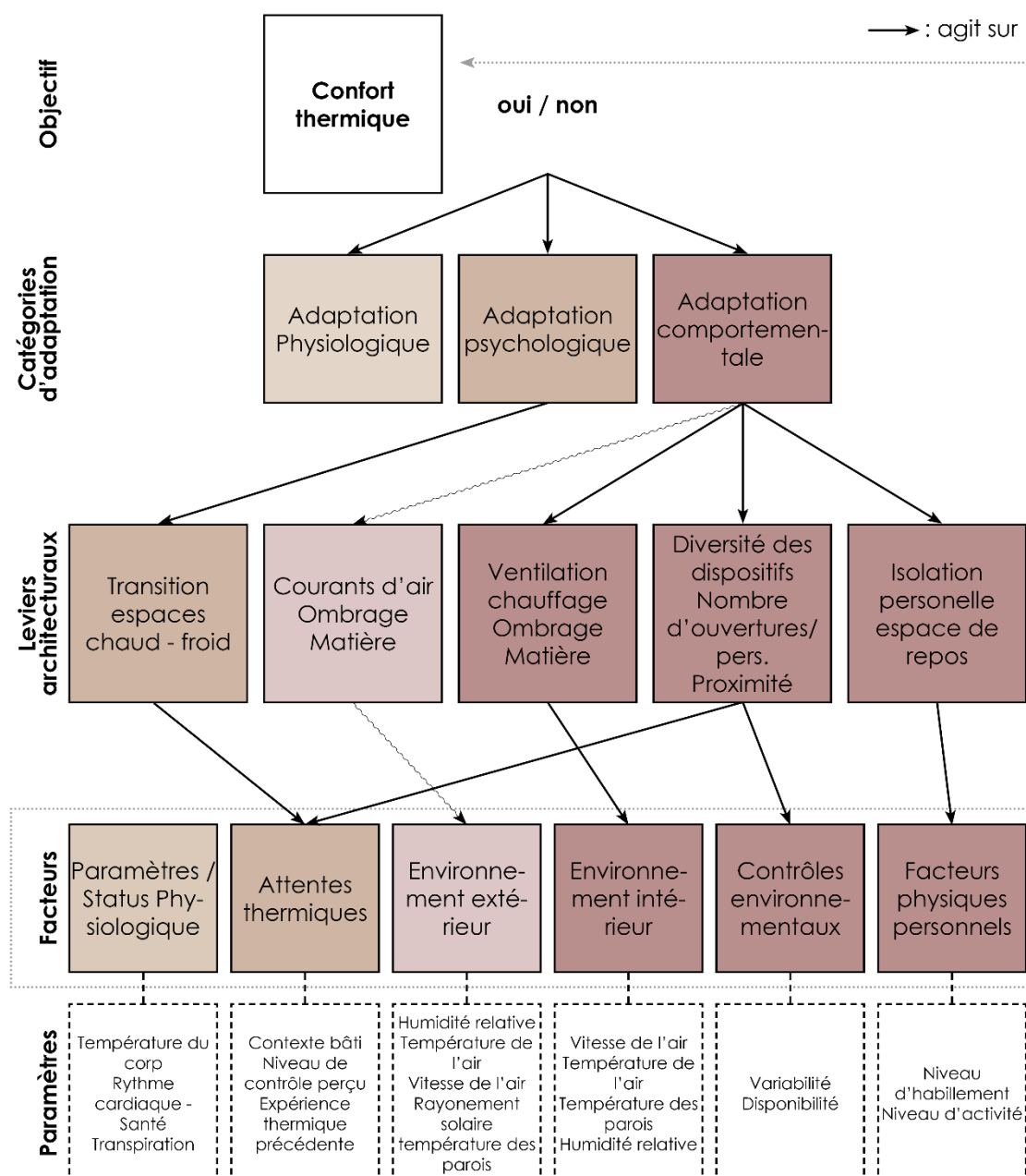
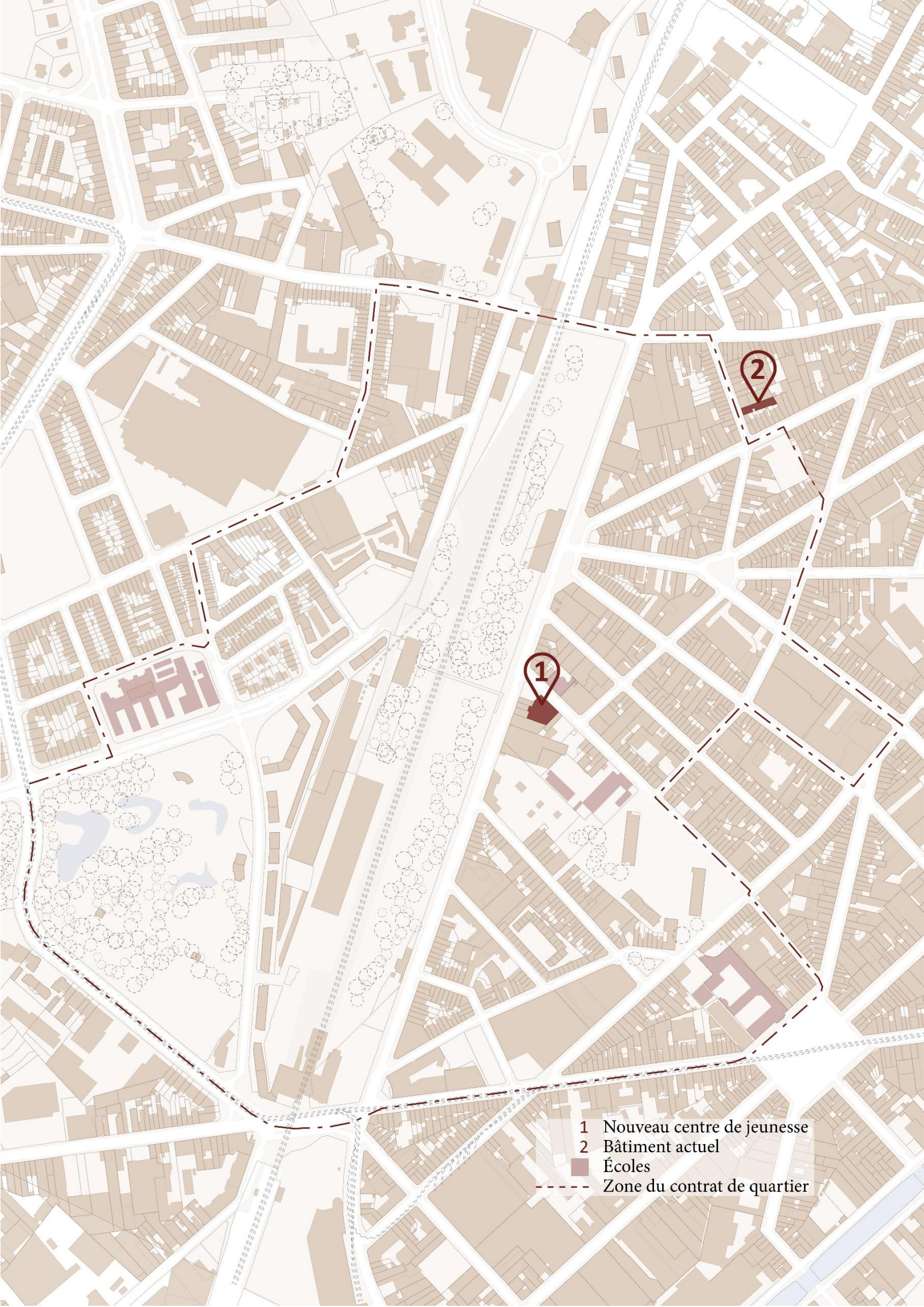


Figure 14 : Catégorisations des leviers architecturaux en vue du confort thermique. Inspiré et adapté de (Liu, Yao, & McCloy, 2012).



- 1 Nouveau centre de jeunesse
- 2 Bâtiment actuel
- Écoles
- - - Zone du contrat de quartier

4. Résultats

4.1. Contexte du projet

Le projet que nous allons présenter ici s'inscrit dans le contrat de quartier durable « Autour du Parc de l'Ouest » (Molenbeek1080, s.d.), à Molenbeek-Saint-Jean. Le but de ce contrat de quartier est, en résumé, de relier les deux parties de Molenbeek coupées par la friche du chemin de fer de la Gare de l'Ouest.

Le projet, directement inscrit dans ce contrat de quartier, consiste en la réalisation d'un nouveau centre de jeunesse, pour remplacer les anciens bâtiments de l'ASBL « Centrum West ». Le nouveau site choisi est un bâtiment industriel désaffecté, situé sur la rue JB Decock. Cette rue sera elle-même réaménagée en axe doux, et se prolonge de l'autre côté de la friche grâce à la parcelle de la station de métro Beekkant, qui elle-même fait le lien avec le reste du quartier.

La nouvelle maison des jeunes est donc située à un point stratégique au centre de Molenbeek, à un endroit où, avant, les jeunes n'avaient pas beaucoup de lieux où s'adonner à leurs loisirs.

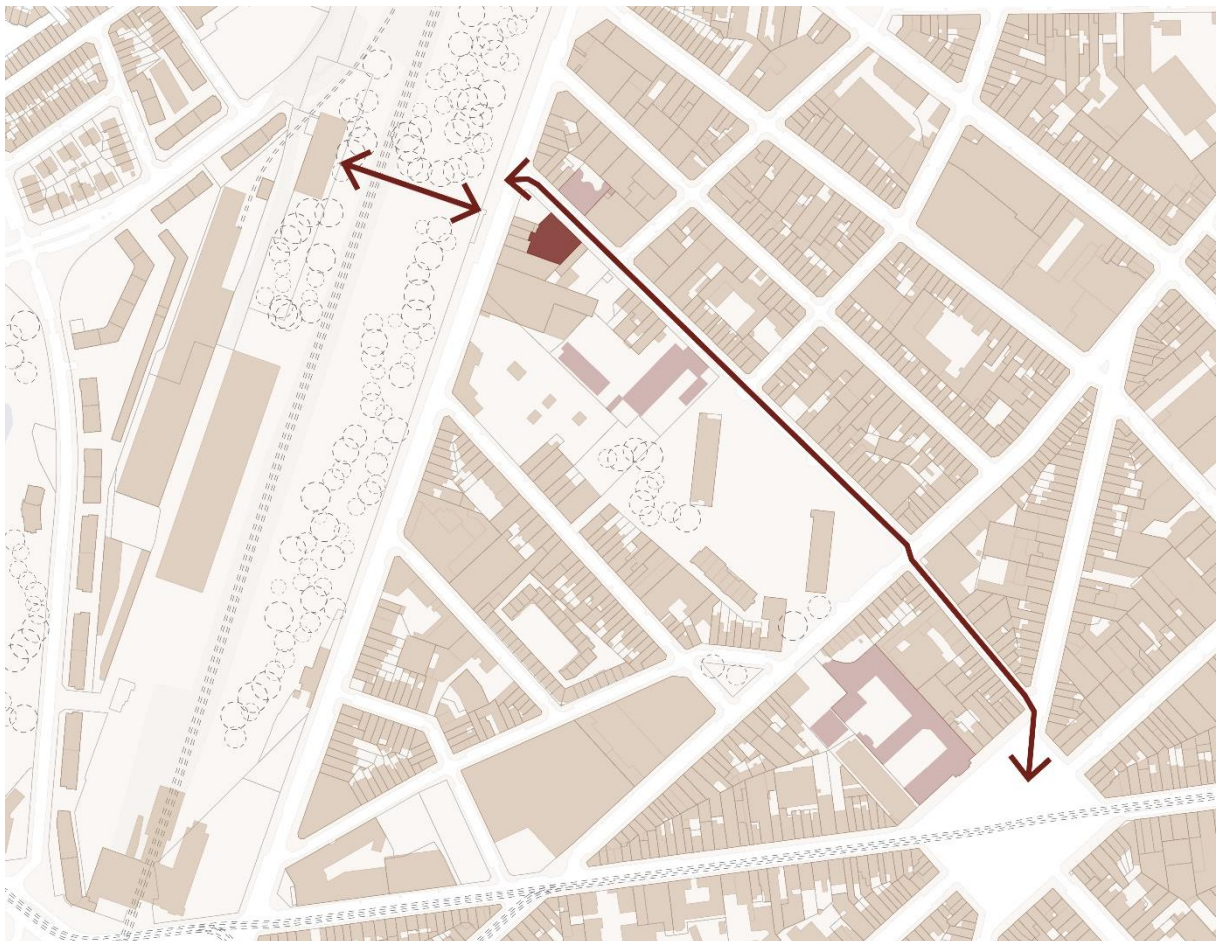


Figure 16 : Axe doux JB Decock et Passerelle Beekkant

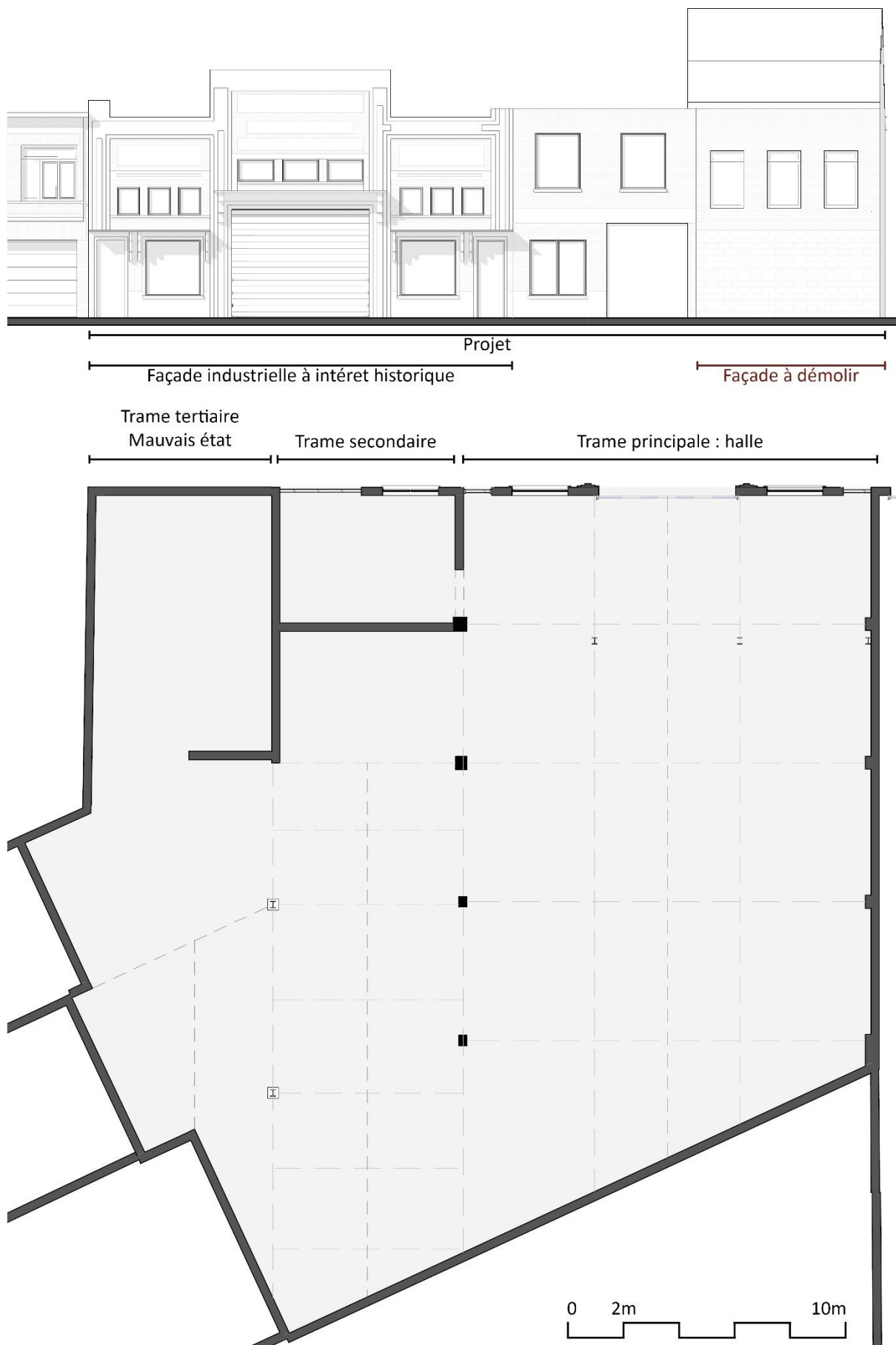


Figure 17 : Plan et élévation situation initiale, 1:200e

4.2. Centre de jeunesse

4.2.1. Intentions

La conception thermique étant applicable par nature à tous les programmes architecturaux, le choix du projet s'est fait ici à l'aide du programme du contrat de quartier, qui proposait un centre de jeunesse (Molenbeek1080, 2018). Toutefois, nous avons vu que les besoins thermiques d'un bâtiment dépendent des besoins des occupants. Nous avons également vu à travers nos recherches que le confort et le plaisir thermique sont favorisés dans des environnements à atmosphère variable. Or, le programme du centre de jeunesse justifie en lui-même ces variabilités, par la diversité des fonctions qu'il va accueillir. La première étape du projet sera donc d'explorer ce programme et de déterminer les besoins de confort induits par celui-ci.

D'abord, le programme se veut flexible et potentiellement adaptable à de nouveaux besoins futurs, ce qui sera favorisé par le caractère ouvert du plan actuel industriel. De plus, il devra être en connexion directe avec l'espace public.

Ensuite, le programme tel que présenté ici représente une ligne directrice plutôt qu'un but fixe à atteindre. Les principes à respecter relatifs à la fonction de centre de jeunesse sont l'accès libre aux différentes fonctions, mais aussi l'indépendance d'accès pour ces fonctions.

Ainsi, le geste principal du projet sera de diviser le bâtiment en deux zones, la première comprenant la halle principale, qui sera un espace en forte connexion avec l'extérieur ; l'ambiance intérieure connaîtra alors de grandes variations en fonction de la météo. L'enveloppe de cet espace sera donc travaillée pour améliorer son étanchéité à l'air, pour mieux contrôler la ventilation. Les châssis et la toiture devant être changés, ils pourront fournir une meilleure isolation au besoin.

La deuxième grande zone se situera dans les deux autres trames, et se composera des espaces de vie principaux, comme des bureaux et des ateliers pour les jeunes. Cette zone devra répondre à des critères de confort plus stricts et sera donc beaucoup plus isolée.

Par ailleurs, comme il s'agit ici d'une rénovation, le travail en plusieurs zones thermiques nous permet de faciliter le processus d'isolation, voire de le limiter. Le bâtiment existant fournit déjà une première barrière aux éléments, et certaines parois isolantes ne serviront que de seconde peau intérieure, et seront alors moins sensibles aux aléas extérieurs.

4.2.2. Programme détaillé

Le programme du centre de jeunesse se divise en trois entités principales : la première, la plus directement accessible au public, la seconde composée des espaces de loisirs et d'apprentissage pour les jeunes, et la dernière des bureaux nécessaires au fonctionnement de l'association. Une cour intérieure sera créée au centre du bâtiment, apportant de la lumière naturelle et des opportunités de ventilation. La circulation se fera principalement autour de celle-ci. En plus de cela, un logement, d'au moins une chambre, sera inclus dans le programme. Celui-ci ne sera pas élaboré.

1. Entité A :

- I. Accueil au public ;
- II. Salle polyvalente pour spectacle, (capacité : 100 personnes) ;
- III. Cuisine (cours/ateliers) ;
- IV. Stockage ;
- V. Atelier technique (réparation de vélos) ;

Mis à part la salle de spectacle, on peut raisonnablement se dire que cette entité pourra avoir un environnement intérieur en-deçà des normes de confort classique. En effet, si on se réfère au concept d'attente thermiques développé dans la théorie du confort adaptatif (de Dear & Bragger, 1998), l'accueil est le premier espace en venant de l'extérieur, on sera donc encore influencé par l'environnement extérieur, sans attendre une rupture radicale d'ambiance. De plus, l'atelier technique, la cuisine et la salle polyvalente sont tous trois des zones où le degré d'habillement est potentiellement élevé, de même que le taux de métabolisme, ce qui réduit alors la température minimum confortable.

2. Entité B :

- I. Studio de musique, isolé acoustiquement (min 40m²) ;
- II. Studio polyvalent (capacité : 25 personnes) ;
- III. Studio Crea & Kids (capacité : 25 personnes) ;
- IV. Studio PC et devoirs (capacité : 25 personnes).

Le principal point à retenir pour cette entité est la nécessité d'avoir trois espaces principaux séparés : un studio, un atelier pour les jeunes enfants, et un atelier pour les adolescents. Le studio polyvalent pourra être couplé à d'autres fonctions, et ne constitue pas un espace en soi. Cette entité sera isolée thermiquement et l'objectif sera de garantir une plage de confort correspondant à celle vue en Figure 13 : Plages de températures confortables fournies par PCS. (Zhang et al, 2015, fig. 5) Figure 13, de 16 à 30°C, pour un bâtiment ventilé naturellement avec des systèmes de confort personnels. Nous pouvons également y admettre des variations d'ambiance. Ainsi, le studio de musique étant isolé du reste et n'ayant pas besoin de lumière naturelle directe, sera placé en conséquence au nord, et est reculé de la façade de la cour, pour produire une zone tampon entre son intérieur et l'extérieur. Il agira ainsi comme un cocon, avec l'ambiance intérieure la plus stable.

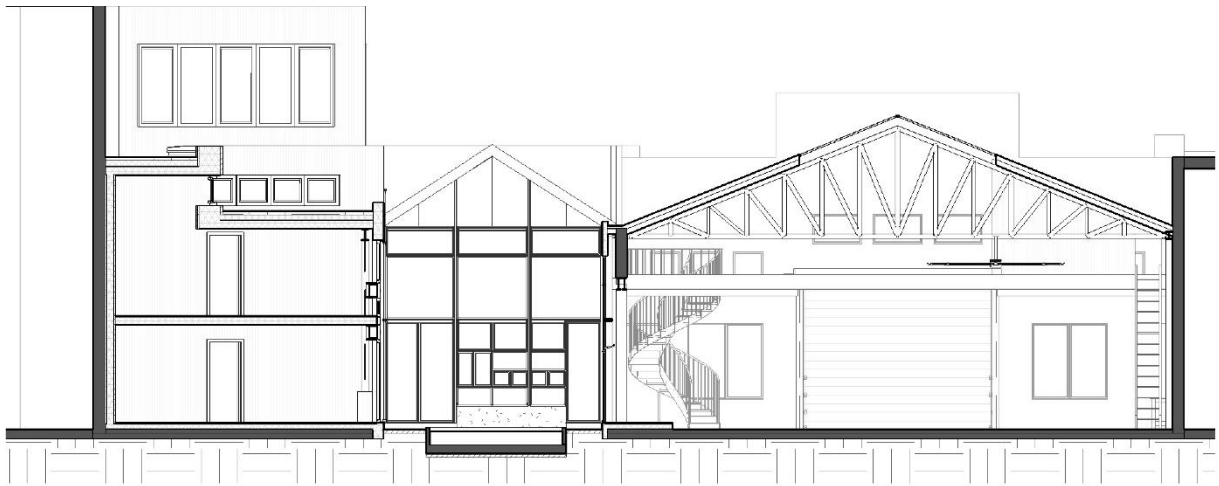


Figure 18 : Plan rez-de-chaussée et coupe, 1:200e

3. Entité C :

- I. Bureaux, (capacité : 12 personnes) ;
- II. Kitchenette ;
- III. Salle de repos ;
- IV. WC ;
- V. Vestiaires.

Les espaces de bureaux dans le projet présentent les mêmes besoins thermiques que l'entité B. En effet, dans le fonctionnement actuel de la maison des jeunes, les bureaux sont accessibles à tout le monde, et se sont aussi les jeunes qui y travaillent. Les considérations de confort seront donc plus flexibles que pour des bureaux classiques. Cette entité se situe donc à l'intérieure de la partie isolée du bâtiment, et est du côté de la rue, répartie sur les deux trames secondaires.

Sur le plan du premier étage ci-contre, nous pouvons voir que des espaces supplémentaires non attribués se dessinent, comme au-dessus du studio et à l'avant de la halle principale. Ces espaces ne sont pas séparés thermiquement de la zone de la halle, mais sont tout de même séparés spatialement par leur niveau, et par une matérialité différente. Cela crée une ambiance thermique différente, par des surfaces de contact plus chaudes et par une hauteur supplémentaire qui, on le suppose, amènera à des températures sensiblement plus élevées.

Ce point sur la différence de matérialité s'étend à tout le projet. La zone thermique de la halle ne connaît pas beaucoup de changements par rapport à la situation initiale de dalle de béton et de murs en briques. Cependant, la circulation autour de la cour centrale, et les nouvelles interventions, sont marquées par une matérialité différente, en bois. Cette matérialité produira en premier lieu une perception thermique différente de ces nouveaux espaces, et fera alors la transition avec la zone isolée thermiquement, qui présentera elle aussi une matérialité plus chaleureuse, en bois.

Ce principe de différenciation de l'intervention par rapport à l'existant s'intègre également à une logique constructive et écologique.

La cour centrale est également traitée différemment selon sa zone adjacente. Les trois cotés jouxtant la zone de la halle ne doivent pas présenter une résistance thermique élevée, au contraire du côté servant de façade aux ateliers pour les jeunes.

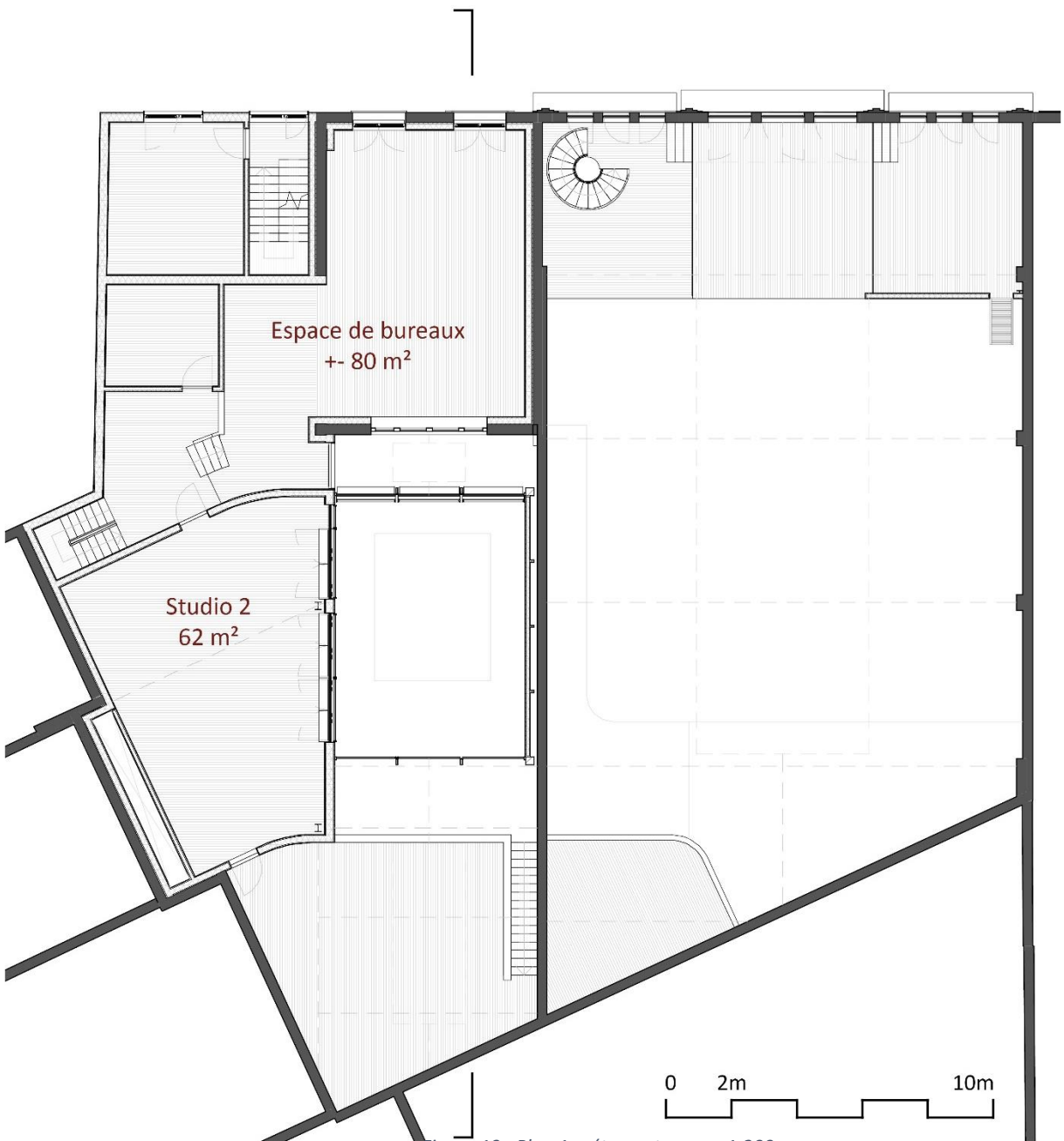


Figure 19 : Plan 1er étage et coupe, 1:200

4.3. Environnement variable

Comme nous l'avons vu dans notre recherche, la première étape en vue de trouver du confort et du plaisir thermique, est la variabilité de l'environnement intérieur dans le temps et dans l'espace. Nous avons aussi vu ci-avant la façon d'intégrer ce principe dans le projet.

Un moyen que le concepteur a aujourd'hui pour aider cette conception et en vérifier son efficacité est la simulation thermique avec des logiciels spécialisés. C'est donc ce que nous allons faire pour évaluer, ou quantifier, les ambiances dans le bâtiment. Ici, nous allons utiliser le logiciel *Wufi Plus*.

4.3.1. Simulations

Avant de commencer la simulation, il faut déterminer les différentes zones à évaluer. De ce fait, nous allons diviser le bâtiment en 4 zones principales de manière similaire à la division du programme : la halle, l'espace de bureaux, les ateliers et le studio de musique.

Il est également nécessaire de déterminer des températures minimum et maximum pour ces zones. Pour l'espace isolé, comme nous l'avons dit précédemment, la plage des températures acceptables sera comprise entre 16 et 30° C, conformément à la Figure 13. Pour la zone de la halle, évaluer une plage précise de température sera plus subjectif, en l'absence de norme de confort pour de tels espaces. Nous commencerons par accepter une plage plus large que celle de la zone isolée. Ensuite, la température minimum acceptable sera fixée arbitrairement à environ 10°C. Nous avons effectivement vu que les normes de confort en vigueur indiquent la limite de l'adaptation à des températures extérieures de 10° C. Notre intuition nous pousse donc à choisir cette température pour notre espace. De plus, l'outil de calcul du vote moyen prévisible de l'université de Berkeley (CBE Thermal Comfort Tool, s.d.) donne également cette température minimum, pour un taux de métabolisme de 3.8 *met*, correspondant à une activité physique, et un taux d'habillement de 1 *clo*, correspondant à un habit intérieur d'hiver.

4.3.1.1. Halle non isolée

La première itération se concentre sur la halle, pour évaluer les efforts constructifs nécessaires. La question est ici de savoir si étanchéifier le bâtiment à l'air est suffisant, en gardant une faible isolation au niveau du toit et des ouvertures, ou si une isolation supplémentaire est nécessaire.

Matérialité

On considère les murs existants en brique, le sol existant en béton, la toiture existante en fibrociment (à changer de toute façon), et les ouvertures en simple vitrage.

	Matériaux	Épaisseur [cm]	U [W/m ² K]
Murs existants	Brique + enduit	30	2
Dalle	Béton	20	
Toitures	Fibrociment	0,8	5,7
Ouvertures	Simple vitrage		5

Ventilation

L'intervention nécessaire dès le départ était d'améliorer l'étanchéité à l'air de la halle, pour la séparer thermiquement de l'extérieur et avoir un meilleur contrôle sur la ventilation. On admet donc ici des infiltrations d'air réduites à 0,8 volume équivalent par heure (environ 1750 m³/h). La ventilation naturelle augmente progressivement jusqu'à 3 volumes par heure (6600 m³/h) en été pour ensuite diminuer à nouveau.

Résultats

Les résultats de cette première simulation indiquent des températures intérieures allant de **0,8 à 34° C**, avec une moyenne de **14,8° C**. Il est intéressant de noter la moyenne des températures hivernales, de **10° C**. Cette moyenne pourrait satisfaire les besoins de base de confort, mais la température minimale est trop basse, et on voit en : Courbe annuelle des températures pour la halle non isolée Figure 20 que la courbe est fréquemment sous la barre des 10° C, ce qui est insuffisant.

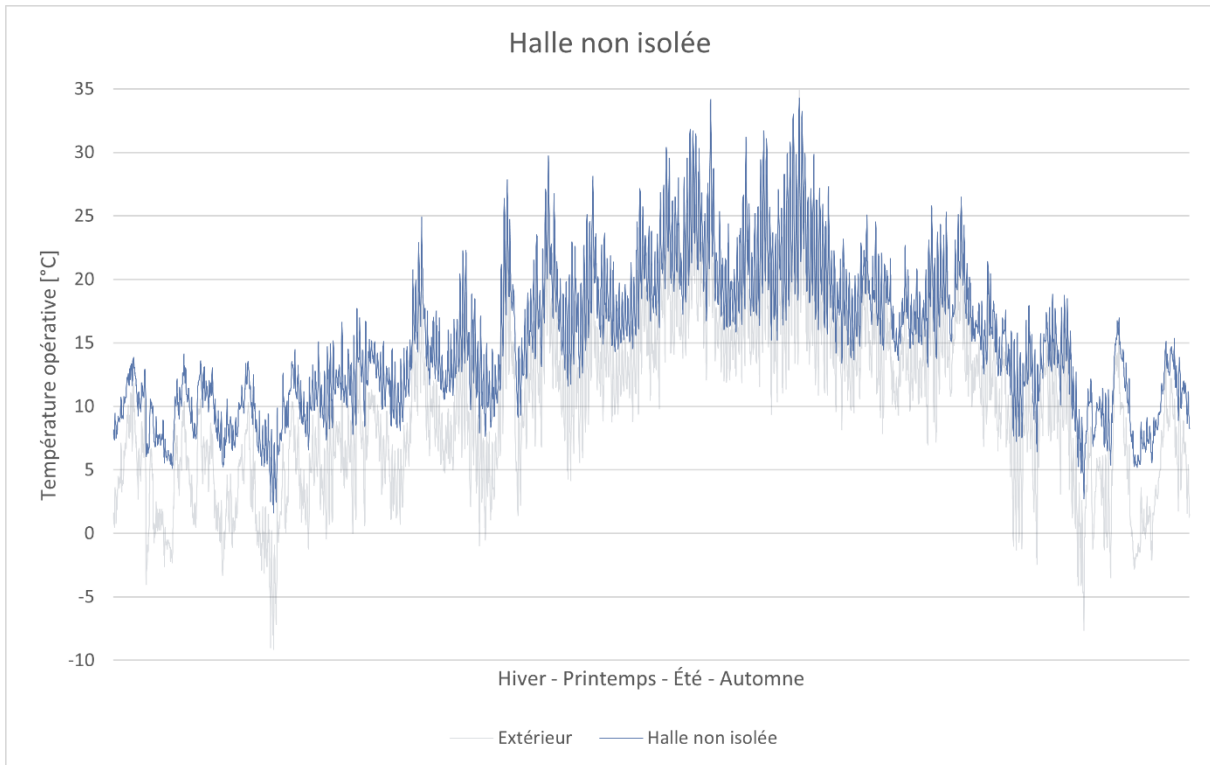


Figure 20 : Courbe annuelle des températures pour la halle non isolée, du 21/12/2020 au 21/12/2021.

4.3.1.2. Halle isolée

Nous allons donc faire la même simulation, en utilisant des parois plus résistantes aux transferts de chaleur. Comme nous l'avons vu, il faut remplacer toute la toiture et toutes les ouvertures. Les efforts se concentreront donc là-dessus. La ventilation est identique.

Matérialité

Les châssis passent donc à du double vitrage, et la nouvelle toiture est légèrement isolée. Les ouvertures en toitures sont réalisées en polycarbonate, qui permet une meilleure isolation. Les murs et le sol ne changent pas.

	Matériaux	Épaisseur [cm]	U [W/m ² K]
Murs existants	Brique + enduit	30	2
Dalle	Béton	20	
Toitures	Revêtement classique + fibre de bois 8cm	10	0,4
Fenêtres	Double vitrage		2,7
Ouvertures de toit	Polycarbonate	4	1,5

Résultats

Les résultats de cette deuxième simulation indiquent des températures intérieures allant de **7,3 à 30° C**, avec une moyenne de **16,6° C**. La moyenne des températures hivernales est de **13,2° C**. On peut également voir sur la Figure 21 que les températures passent rarement en dessous de 10° C.

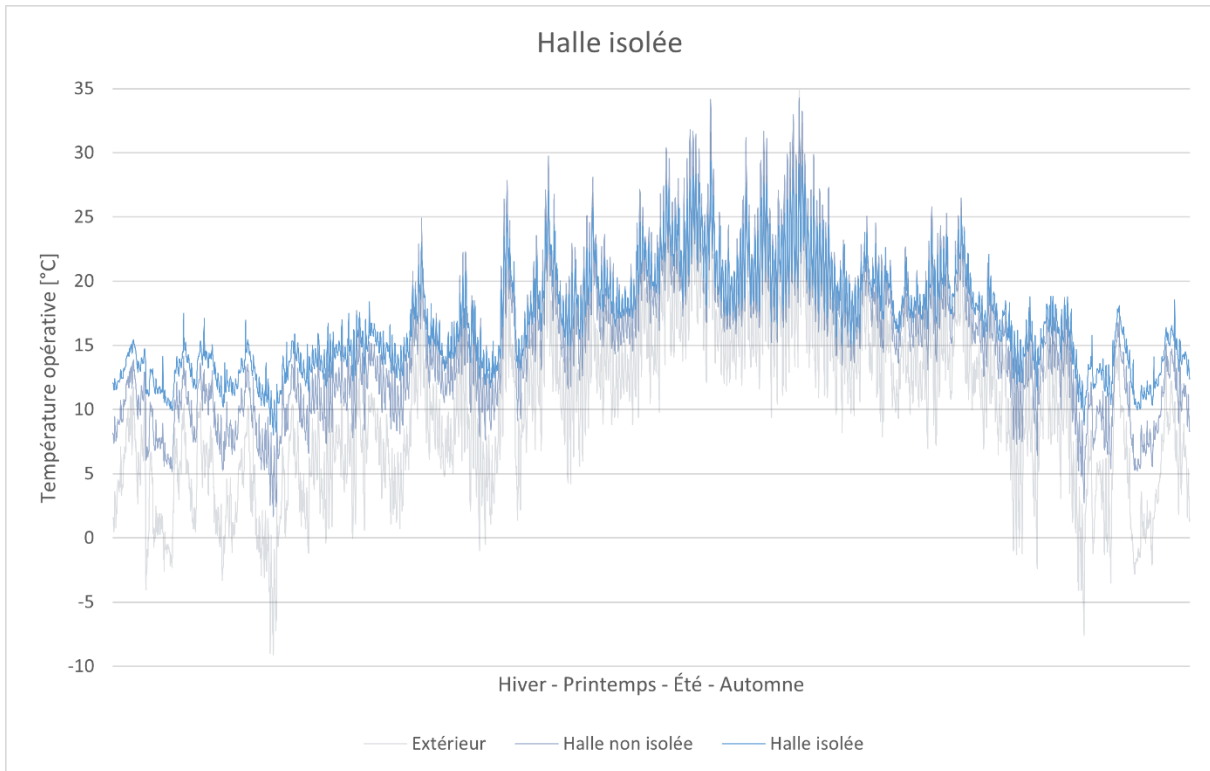


Figure 21 : Courbe annuelle des températures pour la halle isolée, du 21/12/2020 au 21/12/2021.

Isoler un minimum la halle a donc pour effet de stabiliser les températures intérieures, et de garantir un climat confortable pour une plus grande période, et pour plus d'activités potentielles.

En plus de ces résultats sur l'ambiance globale, on peut observer la température des matériaux. Ainsi, le sol en béton varie entre 15 et 27° C, alors que les sols en bois varient eux entre 19,5 et 25° C. la brique varie entre 8 et 28,5° C. On observe donc ici l'influence claire de la matérialité sur l'atmosphère intérieure.

4.3.1.3. Ateliers, bureaux et studio

Nous allons maintenant nous intéresser à la deuxième grande zone thermique du bâtiment, elle-même divisée en plusieurs entités. Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, cette nouvelle partie est insérée partiellement dans le bâtiment existant, et s'étend parfois jusqu'en façade et en toiture.

Matérialité

Cette nouvelle construction est fortement isolée, et la structure est réalisée en ossature bois. Les châssis sont en triple vitrage. Les partitions intérieures sont également isolées pour garantir un zonage thermique optimal, et un nouveau sol est posé sur la dalle existante.

	Matériaux	Épaisseur [cm]	U [W/m ² K]
Murs extérieurs	Ossature bois, fibre de bois	30	0,124
Murs intérieurs	Ossature bois, fibre de bois	24	0,156
Sol	Béton + Ossature bois, fibre de bois	20	0,15
Toitures	Ossature bois, fibre de bois	40	0,1
Fenêtres	Triple vitrage		0,76

Ventilation

On considère premièrement une ventilation hygiénique de base de 22m³ d'air par heure et par personne pendant toute l'année. Ensuite, la ventilation naturelle est dimensionnée en fonction du nombre d'utilisateurs. Pour les ateliers et les bureaux, elle augmente progressivement jusqu'à 1400 m³/h en été, et une ventilation de nuit de 1000 m³/h est mise en place de juillet à aout. Pour le studio, la ventilation est considérée jusqu'à 400 m³/h en été, et 200 m³/h de nuit, de juillet à aout. Comme pour la première zone, il est utile de préciser que le bâtiment fonctionnant avec une ventilation naturelle, ces taux sont indicatifs, mais ne représentent pas la réalité.

Protections solaires

Pour les baies de la cour centrale, des stores extérieurs sont mis en place, ce qui est pris en compte dans la simulation. De la même manière que la ventilation, les taux d'ombrage sont indicatifs, et seront en réalité plus variables.

Résultats

Pour l'espace de bureaux, les températures vont de 15,9 à 29,6° C, avec une moyenne de 22° C. Pour les ateliers, les températures vont de 16,3 à 31,1° C, avec une moyenne de 22,2°C. Enfin, pour le studio, les températures vont de 18,2 à 27,4° C, avec une moyenne de 23,3°C.

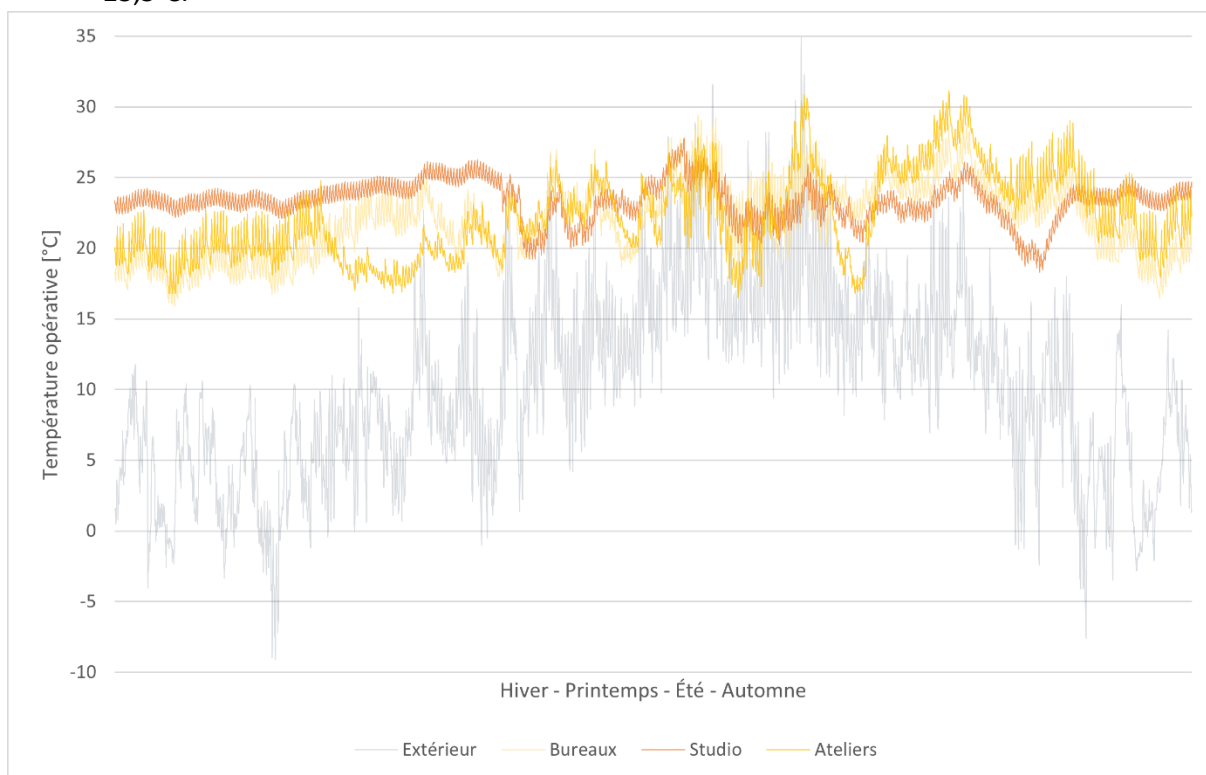


Figure 22 : Courbes des températures annuelles pour les zones isolées du bâtiment, du 21/12/2020 au 21/12/2021.

Nous pouvons voir sur la Figure 22 que la zone de bureaux et la zone d'ateliers présentent des courbes très similaires ; les ateliers, recevant plus de soleil, sont légèrement plus chauds. De plus, nous pouvons voir que les températures minimales et maximales sont des extrêmes, qui ne représentent pas la situation toute l'année.

On peut également voir une nette différence de la courbe du studio de musique, qui est plus stable et plus mesurée. La volonté d'en faire une zone à part, une sorte de cocon thermique, est donc confirmée par la simulation.

4.3.2. Résultats généraux

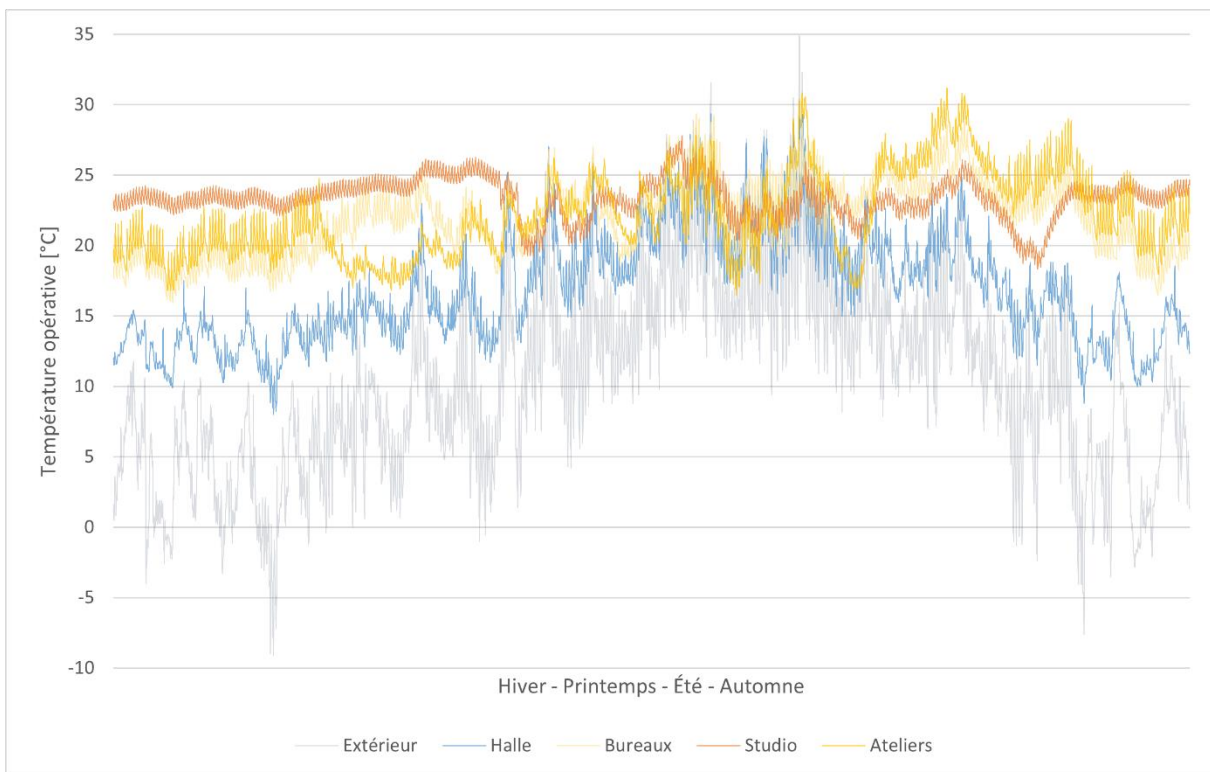


Figure 23 : Courbes annuelles des températures, du 21/12/2020 au 21/12/2021.

Sur ce graphique en Figure 23, nous pouvons voir le comportement global des différentes zones du bâtiment. Nous remarquons le succès de la mise en place des ambiances variables au sein du bâtiment, spécialement entre la halle et les autres zones. Cependant, on remarque que la halle est plus froide que les bureaux et les ateliers en été. Ceci montre bien l'enjeu de la surchauffe et de la climatisation dans les bâtiments fortement isolés. De plus, on remarque qu'en été, les courbes se rapprochent ; la séparation des ambiances sera alors moins marquée.

4.4. Contrôle par les occupants

Le second point soulevé durant notre recherche est l'importance observée, dans la théorie du confort adaptatif, de donner le contrôle de l'environnement aux occupants. Nous avons également vu que l'action de l'occupant sur les opportunités adaptatives dépendait du nombre et de la variété de ces dispositifs, et de la distance de l'utilisateur par rapport à celles-ci. Il faudra donc prendre en compte ces principes dans le projet.

4.4.1. Ventilation

La ventilation se divise en deux domaines principaux : la ventilation naturelle et la ventilation mécanique. Pour favoriser l'action des occupants, une ventilation naturelle opérée manuellement sera donc privilégiée. Cependant, les zones fortement isolées ont besoin d'une ventilation hygiénique, les infiltrations d'air n'étant pas suffisantes. Il faudra donc prévoir des débits d'air minimums assurés. Une option intéressante à mettre en œuvre dans ce projet est la ventilation mécanique à récupération de chaleur, mais décentralisée. Ainsi, ces systèmes individuels répartis dans les différentes zones assurent une ventilation minimale, tout en étant

contrôlables individuellement par l'occupant. Ce système a également l'avantage d'être visible, ce qui permet aux occupants de se rendre compte de son action.

La ventilation naturelle sera elle assurée par des fenêtres ouvrantes réparties dans tout le bâtiment. Des ouvertures dans les toits assurent également une bonne circulation de l'air.

En plus des fenêtres, des cloisons ouvrantes seront mises en place, qui pourront être ouvertes en fonction des besoins variables de ventilation.

4.4.2. Zones

Le bâtiment ne présentant pas de système de chauffage ou de climatisation, les possibilités de se réchauffer ou de se refroidir seront assurées par les différentes atmosphères du bâtiment. De cette façon, ces zones décrites dans le chapitre précédents peuvent faire office d'opportunité d'adaptation comportementale, en plus de l'adaptation psychologique due aux changements de température. Ainsi, ce sera le bâtiment lui-même qui pourra réchauffer les occupants, et les différentes zones pourront être recherchées en fonction de leur température, en plus de leur fonction de base. Nous retrouvons donc ici le concept de « microclimat intérieur comme un artefact » (Sahakian, Rau, & Wallenborn, 2020), qui rend visible le climat intérieur et qui amène les occupants à repenser leurs pratiques au sein du bâtiment.

Des opportunités d'adaptation de l'espace en lui-même sont aussi fournies par le projet. Ainsi, des rideaux pourront être déployés pour maintenir la sensation de chaleur dans un espace restreint, et pour augmenter la température des parois.

Dans ce projet, les occupants auront donc un contrôle quasi-total sur les opportunités de réglage de l'ambiance comme la ventilation. Cela permet comme nous l'avons vu d'augmenter la tolérance des occupants par rapport aux changements de température et d'atmosphère. Cependant, pour garantir une ventilation ou un refroidissement minimum, un contrôle à distance et automatisé de certaines ouvertures pourrait être recommandé.

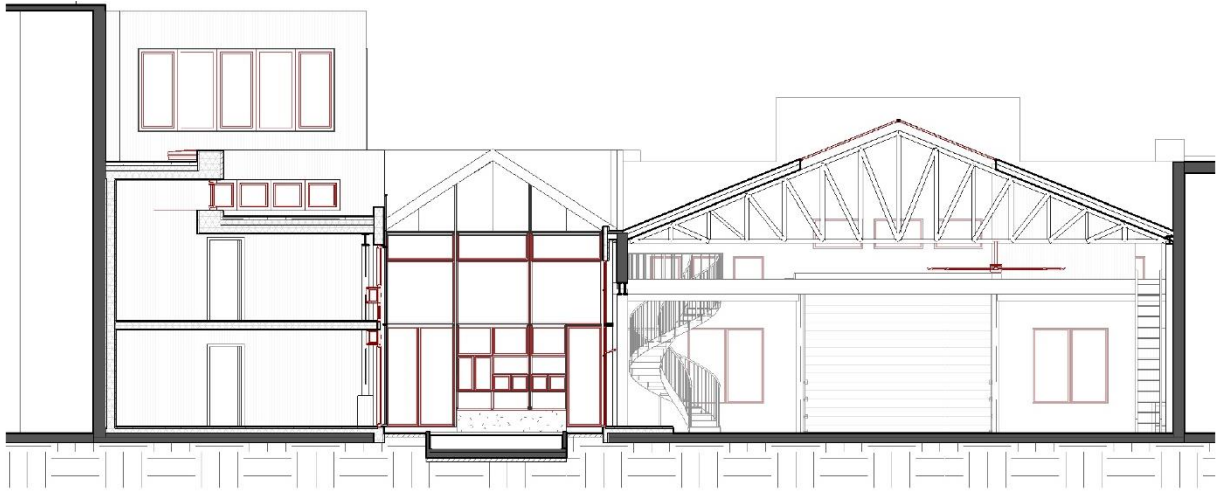


Figure 24 : Opportunités adaptatives dans le projet

4.5. Action personnelle

Finalement, et pour compléter le point sur le contrôle par les occupants, nous avons découvert que pour leur apporter du plaisir thermique, il faut concevoir des systèmes qui agissent localement et individuellement sur les corps. Certaines opportunités adaptatives décrites au chapitre précédent seront donc optimisées pour avoir une action locale sur l'occupant.

Nous avons vu avec les études sur l'alliesthésie (de Dear R. , 2011) et sur les systèmes de confort personnels (Zhang, Arens, & Zhai, 2015) que les différentes zones du corps sont sensibles à différents stimuli. Nous concevons donc des systèmes ventilant le haut du corps et la tête, et d'autres qui réchauffent le bas du corps ou le torse.

La plupart des systèmes de confort personnel de ventilation se retrouvent dans ce projet autour de la cour centrale. En effet, c'est un lieu de circulation, et donc de transition de zones thermiques, ce qui privilégie l'alliesthésie.

Le premier système ci-contre combine une action de ventilation et d'isolation. Il consiste en une assise posée contre une baie dimensionnée de manière à avoir une ouverture localisée vers la tête. Le banc lui-même peut se déployer pour isoler le corps de la vitre froide. On peut par la même occasion remarquer les stores extérieurs, qui permettent de rester à l'ombre, ou encore la fenêtre projetante, accessible depuis le couloir.

Nous pouvons ensuite voir, ci-dessous à gauche, un autre système de ventilation personnel, cette fois-ci dans la zone isolée. On peut donc voir contre le chassis l'appareil de ventilation mécanique dont nous parlions précédemment. Grâce au système de récupération de chaleur, l'air pulsé par cet appareil est plus chaud que l'air extérieur. Au dessus de l'appareil, une fenêtre à hauteur d'enfant permet la ventilation naturelle.

En bas à droite, nous retrouvons un système de banc modulaire servant ici d'assise pour la salle de spectacle. Ce mobilier apporte premièrement une isolation supplémentaire, et peut accueillir des coussins chauffants, qui viendront réchauffer les corps des utilisateurs. Quand il fera trop froid dans la salle, ces systèmes pourront palier au manque de chaleur. On peut apercevoir en arrière plan le rideau qui limite l'espace et fournit une première barrière thermique.

Pour fournir une ventilation supplémentaire en cas de forte chaleur, des ventilateurs de plafond seront intégrés de manière stratégique, comme dans la grande halle, vue en Figure 24.

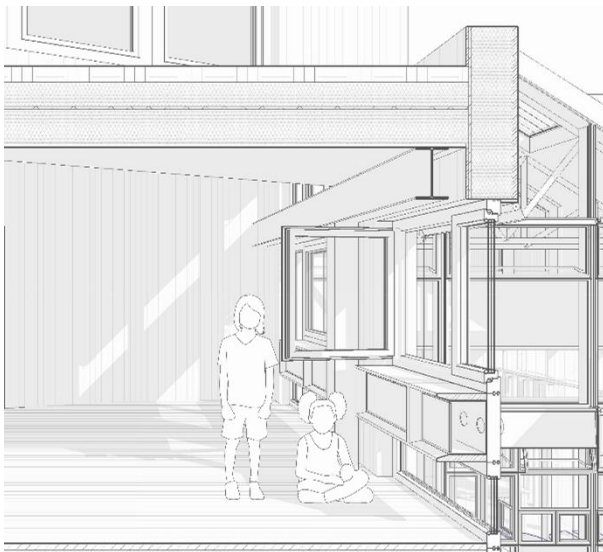


Figure 26 : Système de ventilation mécanique



Figure 25 : Assise chauffante



Figure 27 : Assise isolée et ventilation localisée

5. Discussion des résultats

Nous avons vu pendant notre recherche que la littérature scientifique autour du confort thermique offre d'innombrables informations à destination des concepteurs de projet. Trois grands leviers successifs sont alors apparus, à savoir l'environnement variable, le contrôle des opportunités adaptatives par l'occupant et l'action locale sur les personnes. Le premier levier s'est révélé comme la base de la conception en vue du plaisir thermique, qui permet alors une plus grande efficacité des deux suivants.

Par le projet, nous avons vu que la variabilité des ambiances dans le projet peut être conçue relativement intuitivement, selon ses connaissances de base. Cette variabilité, et le comportement thermique général du bâtiment, peuvent en plus être simulés et vérifiés assez facilement à l'aide de logiciels spécialisés. Cependant, la méthode de simulation développée ici reste assez simple ; particulièrement dans le cas d'un bâtiment ventilé naturellement et par les occupants, elle ne garantit pas une mise en œuvre exacte de ces ambiances variables. Pour cela, il faudra une modélisation du bâtiment plus poussée, et particulièrement l'intégration des modèles de comportement des occupants, comme ceux montrés par Obyn et Van Moeseke (Obyn & Van Moeseke, 2015). En plus de cela, nous avons vu l'importance de la ventilation naturelle pour le fonctionnement du modèle adaptatif (de Dear & Bragger, 1998), et son impact sur les ambiances et le zonage thermique (Selvnes, 2017). Cette ventilation est également importante pour garantir l'efficacité des dispositifs de confort personnels. Or, ces mouvements d'air ne sont pas quantifiés (au-delà du nécessaire pour les simulations) ni évalués ici.

Ensuite, nous avons vu que pour garantir l'applicabilité de la théorie du confort adaptatif, il faut donner le contrôle de l'environnement intérieur aux occupants. Mais comme nous l'avons vu ci-dessus, le comportement réel des occupants est difficile à prévoir, spécialement pour notre projet, dont l'utilisation de l'espace n'est pas définie à la base. On se fie donc aux concepts majeurs pour prévoir les dispositifs adaptatifs du projet, tandis que l'utilisation réelle ne pourra être vérifiée que dans un projet construit. Cela marque donc l'importance de prévoir un grand nombre de dispositifs, et surtout de garantir une variété de ceux-ci, pour offrir un maximum de possibilités à l'utilisateur, et donc garantir leur efficacité.

En dernier lieu, nous avons vu que pour garantir le confort thermique dans des environnements variables et pour des plages de températures larges, et pour offrir de la satisfaction vis-à-vis de l'environnement, il faut concevoir des systèmes de confort personnels, qui auront une action directe et localisée individuellement sur l'utilisateur. De nouveau, si l'architecte peut dessiner ces systèmes, garantir leur efficacité sera plus complexe. Cependant, beaucoup de systèmes de confort personnels sont déjà répandus sur le marché, et c'est leur intégration à l'architecture qui sera alors importante. Parallèlement à cela, des systèmes insoupçonnés pourraient être mis en place par les utilisateurs eux-mêmes.

Nous pouvons donc dire que si l'architecte peut penser la conception thermique dans sa totalité, une collaboration avec d'autres corps de métiers spécialisés ne pourra qu'être bénéfique au projet, chacun apportant son expertise particulière. Cela permettra d'avoir une conception thermique plus poussée, et l'architecte pourra mettre en œuvre ses idées plus efficacement. Nous avons également vu que le confort est pensé pour satisfaire les occupants ; il est donc nécessaire d'évaluer leurs besoins et leurs attentes. Une collaboration accrue avec ces occupants sera donc bienvenue, et peut être mis en œuvre par exemple par le procédé d'architecture participative, qui n'a pas été exploré dans ce travail. De plus, rappelons que le comportement optimal des occupants n'existe pas, et les comportements effectifs sont difficilement prévisibles. Il est donc important dans le projet de ne pas contraindre les occupants, et de leur laisser une liberté par rapport aux dispositifs adaptatifs.

6. Conclusion

L'objectif de ce travail était de rechercher les moyens et les possibilités de concevoir un projet architectural du point de vue des caractéristiques thermiques des espaces, dans le but de garantir le confort thermique, et d'apporter du plaisir thermique par l'architecture. L'évolution des contraintes environnementales et de nos besoins nous a amenés à isoler de plus en plus nos bâtiments pour garder l'énergie dans l'espace intérieur et créer un environnement confortable pour les occupants. Cette démarche a tendance à créer des environnements neutres coupés de l'extérieur, qui minimisent les sensations thermiques des occupants. C'est pourquoi une réflexion sur les manières de concevoir l'ambiance d'un bâtiment nous paraissait utile et nécessaire.

Nous avons vu aussi que la performance énergétique des bâtiments est un aspect essentiel de la lutte contre le changement climatique. Or, le maintien d'un climat intérieur confortable, en été comme en hiver, est la cause d'une grande part des dépenses d'énergie du secteur, avec les systèmes de chauffage et de refroidissement, ces derniers devenant de plus en plus fréquents avec la hausse globale des températures. La réponse à ces problèmes a été l'amélioration de l'efficacité de ces systèmes et, en architecture, l'isolation thermique des constructions. L'aboutissement de cette logique est la construction de bâtiments passifs, qui elle a tendance à créer des espaces complètement séparés de l'extérieur, avec une seule ambiance intérieure, peu variable.

Parallèlement à cela, la recherche sur le confort thermique a commencé par montrer que maîtriser artificiellement l'ambiance thermique afin d'avoir une plage de températures plus restreinte, satisferait le plus grand pourcentage d'occupants, mais elle a vite évolué. La théorie du confort thermique adaptatif qui s'est alors développé a montré que différentes personnes n'ont pas les mêmes préférences en termes de confort thermique, ni les mêmes atmosphères idéales. Elle a montré que les personnes ont des capacités d'adaptation vis-à-vis de l'environnement et que, pour satisfaire un maximum de personnes, un bâtiment doit supporter ces adaptations. Ainsi, un bâtiment fonctionnant avec une ventilation naturelle apporte un moyen d'adaptation facile pour les occupants, et pourra en définitive être confortable sur une plus grande plage de températures. Cela permettra donc des économies de chauffage et de climatisation. Par ailleurs, dépendant des activités qui s'y passent, tous les espaces d'un bâtiment n'ont pas forcément les mêmes besoins de chaleur pour satisfaire les occupants.

Le premier point de conception est alors la variabilité de l'environnement. Un bâtiment pourra être divisé en plusieurs zones thermiques, apportant chacune des ambiances différentes. Cette variabilité des ambiances est bénéfique pour le confort thermique des occupants. Les analyses de la littérature sur le domaine thermique montrent également que grâce à ces environnements variables, on peut aller plus loin qu'un simple état de neutralité vis-à-vis de l'ambiance, en procurant de la satisfaction et du plaisir thermiques.

Le second point de conception est le contrôle de l'environnement intérieur par les occupants. Il est donc indispensable de permettre un certain nombre d'opportunités adaptatives, et donc de dispositifs permettant ces adaptations pour les occupants. Il est également indispensable pour l'architecte de dessiner ces dispositifs pour les utilisateurs, dès le départ du projet, avec des fonctions claires et identifiées, facilement appropriables.

Le troisième point de conception est l'action locale des dispositifs de confort. Nous avons découvert le mécanisme d'alliesthésie, qui fournit une explication sur le fonctionnement du confort thermique, et sur l'intérêt de fournir des ambiances variables. Pour apporter du plaisir thermique, il faut donc favoriser les stimuli thermiques locaux. Il faut donc concevoir des

systèmes de confort personnels, qui agissent individuellement sur les occupants, et sur une zone précise de leur corps. Par leur action individuelle, ces systèmes prennent en compte les différentes sensibilités des utilisateurs, et leur intégration au projet permet un taux de satisfaction maximal vis-à-vis de l'environnement thermique.

Finalement, on peut voir que pour une conception thermique, c'est bien l'occupant qui est au centre de nos préoccupations. Nous avons pu constater que les ambiances thermiques ont également une dimension sociale, dans le sens par exemple où le foyer chauffé représente un espace où des activités sociales ont lieu. Un espace avec une certaine atmosphère peut donc avoir une signification au-delà de ses simples caractéristiques thermiques. Lisa Heschong parle par exemple des saunas finlandais, du foyer central des maisons traditionnelles ou encore des bay-windows (Heschong, 1992). De plus, avoir des ambiances variables et aller au-delà du confort thermique en apportant des opportunités de plaisir thermique, rend le climat intérieur « visible » et peut amener à de nouvelles pratiques sociales (Sahakian, Rau, & Wallenborn, 2020). Cela permet également de conscientiser les occupants au caractère thermique de l'architecture, et à ses implications sur le climat de manière globale, ce qui peut également mener à des pratiques plus écologiques et durables.

En prenant en compte tous les paramètres impactant le confort thermique des occupants, on peut non seulement créer un bâtiment qui apporte du plaisir aux occupants, mais aussi renforcer la dimension culturelle et sociale d'un lieu.

L'hypothèse de ce travail était qu'en concevant un bâtiment avec des ambiances thermiques différentes, l'architecture serait en mesure d'apporter de la satisfaction par rapport à l'environnement et du plaisir thermique. Nous voulions également montrer que réfléchir à l'ambiance thermique peut être un moteur de conception plutôt qu'une contrainte. À travers la littérature scientifique et la pratique du projet, nous avons donc vu que pour avoir un réel effet sur les occupants et apporter une richesse et un plaisir thermique, il faut voir les espaces premièrement comme créateurs d'ambiance et les dessiner dans le but d'apporter une atmosphère prédéfinie. Mais pour concevoir de tels espaces et déterminer ces atmosphères, il est aussi essentiel de prendre en compte les besoins des futurs occupants, et donc du programme du projet. Il ne faut donc pas se concentrer sur un seul aspect mais voir l'ensemble, comme une boucle vertueuse.

Une des limites de ce travail est l'impossibilité de vérifier l'efficacité des dispositifs mis en œuvre à moins de réaliser le projet. Il faudra donc se fier à la littérature que nous avons exposée, pour assumer que ces dispositifs auront l'effet espéré. De plus, si dans le projet nous nous sommes principalement fiés au programme pour déterminer les besoins minimums des occupants, une approche participative pourrait également être intéressante de manière à aller plus loin dans la personnalisation des dispositifs assurant le confort thermique.

Enfin, ce travail nous a montré que la conception thermique a une dimension technique très importante, et qu'il est alors conseillé pour l'architecte de travailler avec quelqu'un de spécialisé, faisant le pari que cette relation de travail sera bénéfique au projet et à sa conception thermique.

Bibliographie

- 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, 60-66.
- Arens, E., Zhang, H., Pasut, W., Warneke, A., Bauman, F., & Higuchi, H. (2011). Thermal comfort and perceived air quality of a PEC system. *Indoor Air 2011*(a345-1). Récupéré sur <http://www.escholarship.org/uc/item/3sv803jx>
- Bernardi, N., & Kowaltowski, D. (2006). Environmental Comfort in School Buildings: A Case Study of Awareness and Participation of Users. *Environment and Behaviour*, 38, 155-172. doi:<https://doi.org/10.1177/0013916505275307>
- Cabanac, M. (1971). Physiological Role of Pleasure. *Science*, 173, 1103-1107. doi:10.1126/science.173.4002.1103
- Carlucci, S., Bai, L., de Dear, R., & Yang, L. (2018). Review of adaptive thermal comfort models in built environmental. *Building and Environment*, 137, 73-89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>
- CBE Thermal Comfort Tool*. (s.d.). Récupéré sur CBE Thermal Comfort Tool for ASHRAE-55: <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>
- de Dear, R. (2011). Revisiting an old hypothesis of human thermal perception: alliesthesia. *Building Research & Information*, 39, 108-117. doi:<https://doi.org/10.1080/09613218.2011.552269>
- de Dear, R., & Bragger, G. (1998). Developing an Adaptive Model. (U. Berkeley, Éd.) Récupéré sur <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>
- de Dear, R., Kim, J., & Parkinson, T. (2018). Residential adaptive comfort in a humid subtropical climate - Sydney Australia. *Energy and Buildings*, 158, 1296-1305. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.028>.
- de Dear, R., Xiong, J., Kim, J., & Cao, B. (2020). A review of adaptive thermal comfort research since 1998. *Energy and buildings*, 214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109893>.
- Energie Plus. (2007, septembre 25). *Confort thermique : généralité*. Récupéré sur Energie Plus Le Site: <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/>
- Fanger, P. (1986). Thermal environment - Human requirements. *Environmentalist*, 6, 275-278. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02238059>
- Herkel, S., Knapp, U., & Pfafferot, J. (2008). Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. *Building and Environment*, 588-600. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.031>.
- Heschong, L. (1979). *Thermal Delight in Architecture*. MIT Press.
- Heschong, L. (1992). *Architecture et volupté thermique*. (H. Guillaud, Trad.) Marseille: Parenthèses.
- IEA. (2016). *Energy Technology Perspectives 2016*. Paris: éditions OCDE. doi:https://doi.org/10.1787/energy_tech-2016-en
- IEA. (2018). *The Future of Cooling : Opportunities for energy-efficient air conditioning*. Paris: IEA. Récupéré sur <https://doi.org/10.1787/9789264301993-en>

- IEA. (2019). *The Critical Role of Buildings*. Paris: IEA. Récupéré sur <https://www.iea.org/reports/the-critical-role-of-buildings>
- IEA. (2020). *Heating*. Paris: IEA. Récupéré sur <https://www.iea.org/reports/heating>
- Kim, J., & de Dear, R. (2018). Thermal comfort expectations and adaptive behavioural characteristics of primary and secondary school students. *Building and Environment*, *127*, 13-22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.031>.
- Kim, J., de Dear, R., Parkinson, T., & Candido, C. (2017). Understanding patterns of adaptive comfort behaviour in the Sydney mixed-mode residential context. *Energy and Buildings*, *141*, 274-283. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.061>.
- Liu, J., Yao, R., & McCloy, R. (2012). A method to weight three categories of adaptive thermal comfort. *Energy and Buildings*, *47*, 312-320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.007>.
- Marín-Restrepo, L., Trebilcock, M., & Gillott, M. (2020). Occupant action patterns regarding spatial and human factors in office environments. *Energy and Buildings*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109889>.
- Molenbeek1080. (2018). *CQD Autour du Parc de l'Ouest - 3. Programme - 3.1 Projets briques et espace public*. Molenbeek1080. Consulté le Mai 22, 2021, sur <https://molenbeekadm.irisnet.be/fr/je-vis/developpement-urbain/contrat-de-quartier-durable-autour-du-parc-de-louest>
- Molenbeek1080. (s.d.). *Contrat de Quartier Durable Autour du Parc de l'Ouest (2018-2022)*. Consulté le Mai 20, 2021, sur Molenbeek1080: <https://molenbeekadm.irisnet.be/fr/je-vis/developpement-urbain/contrat-de-quartier-durable-autour-du-parc-de-louest>
- Nakamura, M., Yoda, T., Crawshaw, L., Yasuhara, S., Saito, Y., Kasuga, M., . . . Kanosue, K. (2008). Regional differences in temperature sensation and thermal comfort in humans. *Journal of Applied Physiology*, *105*, 1897-1906. doi:<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90466.2008>
- Nicol, J. (2001). Characterising occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans. *In Proceedings of seventh international IBPSA conference*.
- Nicol, J., & Humphreys, M. (2004). A Stochastic Approach to Thermal Comfort--Occupant Behavior and Energy Use in Buildings. *ASHRAE Transactions*, *110*, 554-568.
- Ning, H., Wang, Z., & Ji, Y. (2016). Thermal history and adaptation: Does a long-term indoor thermal exposure impact human thermal adaptability? *Applied Energy*, *183*, 22-30. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.157>.
- Obyn, S., & Van Moeseke, G. (2015). *Compilation de modèles comportementaux : Modélisation du comportement des occupants*.
- Parkinson, T., & de Dear, R. (2015). Thermal pleasure in built environments: spatial alliesthesia from contact heating. *Building Research and Information*, *44*, 1-16. doi:[10.1080/09613218.2015.1082334](https://doi.org/10.1080/09613218.2015.1082334)
- Rahm, P. (2016, Juillet 26). Environ(ne)ment : Philippe Rahm. (CCAchannel, Intervieweur) Youtube. Consulté le Février 6, 2021, sur <https://www.youtube.com/watch?v=0GyV5PWSmL0&list=PLi3KxC8Q8K2hSxWycU3UQXq-kfyKJBbuG&index=2>

- Sahakian, M., Rau, H., & Wallenborn, G. (2020). Making “Sustainable Consumption” Matter: The Indoor Microclimate as Contested Cultural Artifact. *Cultural Sociology*, 14, 1-21. doi:10.1177/1749975520932439
- Schlader, Z., Stannard, S., & Mundel, T. (2010). Human thermoregulatory behavior during rest and exercise — A prospective review. *Physiology and Behavior*, 99, 269-275. doi:10.1016/j.physbeh.2009.12.003
- Selvnes, E. (2017). Thermal zoning during winter in super-insulated residential buildings. *Prom. : Laurent Georges*. Norwegian University of Science and Technology. Récupéré sur <http://hdl.handle.net/11250/2476823>
- Singh, M., Ooka, R., Rijal, H., Kumar, S., Kumar, A., & Mahapatra, S. (s.d.).
- Yamamoto, M., Nishihara, N., Kawaguchi, G., Harigaya, J., & Tanabe, S. (2010). Comparison of the transition of thermal environment in office between Japan and the US, Clima 2010. *RHEVA World Congr.*
- Yan, H., Mao, Y., & Yang, L. (2017). Thermal adaptive models in the residential buildings in different climate zones of Eastern China. *Energy and Buildings*, 141, 28-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.016>.
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.013>
- Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C., & Han, T. (2010). Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts. *Building and Environment*, 45, 389-398. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.015>
- 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, 399-410. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.020>
- Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C., & Han, T. (2010). Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. *Building and Environment*, 45, 380-388. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.018>
- Zhao, Y., Zhang, H., Arens, E., & 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.004>
- Zomorodian, Z., Tahsildoost, M., & Hafezi, M. (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 895-906. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>.

