

Mémoire de master 2

Le confort thermique intelligent dans le logement

Mateo Drif
Suivi par David Serero
17 mai 2024

Mots-clés

Intelligence artificielle, architecture, confort thermique, confort personnalisé, domotique, internet des objets, échelle, architecture passive, maison intelligente, habitat intelligent.

Résumé

Depuis presque toujours, le confort et plus particulièrement le confort thermique est au centre de nos préoccupations quand on parle de concevoir un bâtiment. Notre façon de l'aborder à évoluer avec les différentes problématique qui sont apparus au fil du temps. Pour autant on a toujours pensé que le confort était lié à la qualité de la maison et de son « intelligence ».

Avec l'arrivée de nouvelles technologies à travers la domotique ou plus récemment avec l'intelligence artificielle, notre vision de la maison intelligente semble avoir évolué. Pour autant il semble que l'architecte voit ces nouveautés avec une certaine appréhension et se refuse à l'accepter contrairement aux usagers.

L'évolution de la maison (intelligente) nous conduit aujourd'hui vers une échelle du confort toujours plus petite et précise. Une échelle qui est le résultat de la demande des usagers, toujours plus exigeants et peut-être plus conscients de leurs besoins.

L'objectif est donc de définir en quelle mesures l'ajout de technologies modernes peut être bénéfique (ou non) pour notre confort et notre appréhension de l'espace du logement, aussi bien pour l'architecte que pour les usagers.

Quelles sont les défis que posent ces technologies ? Comment mesure t'on mesure t'on leur impact ?

Est ce que notre métier doit il vraiment s'accaparer ces nouveautés ou est-ce que l'architecte a déjà tous les outils qui lui sont nécessaire à la pratique de sa profession ?

Sommaire

Mots-clés	2
Résumé	2
Sommaire	4
Introduction	6
Partie 1 : La maison intelligente	8
1. L'essor de l'habitat intelligent	8
1.1. Définition d'une maison intelligente	8
1.2. La maison intelligente moderne	10
1.3. La domotique	11
1.4. L'internet des objets	15
2. L'Intelligence artificielle	16
2.1. Les différents types d'intelligence artificielle	17
2.2. Intégrations des IA dans le logement	21
Partie 2 : Atteindre le confort thermique	22
3. C'est quoi le confort ?	22
3.1. Definition confort	22
3.2. La réglementation thermique	23
3.3. Le confort thermique	24
4. Comprendre les habitudes	28
4.1. Etude de cas PlaceLab MIT	28
4.2. Etude de cas Domus Mathieu Gallissot	31

4.3. Comparaison des résultats	34
5. Les différentes échelles du confort	35
5.1. L'échelle de la ville	35
5.2. L'échelle du logement	38
5.3. L'échelle de la pièce	40
5.4. l'échelle individuelle	40
Partie 3 : Le confort thermique sans électronique	42
6. Les solutions passives antiques	42
6.1. Les bâdgirs perses	43
6.2. Le puit canadien	46
7. Les solutions passives moderne	47
7.1. La naturhus	47
Conclusion	52
Bibliographie	54

Introduction

La recherche du confort au sein des logements est une problématique avec laquelle l'architecte travaille depuis l'apparition de la sédentarisation de l'homme. Avec l'aménagement des premières cavernes puis la constructions des premières maisons, l'homme n'a cessé d'être en quête d'un confort toujours plus grand.

Cette quête du confort n'a fait qu'évoluer au fil de l'histoire en parallèle des progressions technologiques, qui lui ont permit de tendre de plus en plus vers un confort personnelles et adapté à chaque individu propre.

D'abord avec des techniques passive pendant l'antiquité, puis petit à petit avec des solutions actives, jusqu'à arriver à une façon plus moderne qui intègre des solutions actives ne nécessitant plus forcément d'intervention humaine.

Nous avons vécu cette évolution de la performance du confort à travers une automatisation de technique de plus en plus efficace, mais peut-être que le plus important dans cette évolutions des performances, c'est la gestion de l'échelle de ces solutions. Avec les solutions antiques on cherchait à apporter du confort aux bâtiments eux memes et non pas aux individus qu'ils l'habitaient. On avait alors un confort généralisé qui se basait plus sur une moyenne arbitrairement définie que sur le besoin des individus. Ainsi l'évolutions du confort a été peut être plus impacté par cette volonté de préciser ses lieux d'applications.

Aujourd'hui par exemple nous avons des recommandations de chauffage idéale par pièce et non plus généraliser sur un appartement ou une maison au complet. Et c'est la peut être la plus grande évolution de notre approches de la

question : l'échelle. En diminuant celle-ci, on tend vers un confort qui se veut personnalisé pour chaque personnes, chaque individu. Un enfant n'a pas les memes besoins qu'un adultes, une personnes frileuse ne ressens pas la température de la même manières que les autres. Chaque personnes étant unique, chaque personnes aura une vision unique de son confort.

Cette évolution dans ça façon de concevoir, elle est permis par l'évolution exponentielle de la technologie, une évolution permis par l'arriver des micro-processeurs et plus particulièrement d'une technologie révolutionnant toutes notre façon d'aborder notre monde : l'intelligence artificielle (IA).

Aujourd'hui, l'IA est un outil qui s'intègre de plus en plus à la conception et à la gestion de nos constructions. On peut alors se demander comment l'architecte et les nouvelles technologies peuvent-ils améliorer le confort des individus au sein d'un logement ?

Pour répondre à cette question il faudra d'abord comprendre l'évolution et le rôle des technologies dans la création d'habitats dit intelligents. Puis, de comprendre leurs répercussions sur notre confort. Enfin, de voir si cette évolution vers l'individualité est nécessaires dans notre rapport au confort.

1. L'essor de l'habitat intelligent

1.1. Définition d'une maison intelligente

D'une certaine manière on peut partir de l'hypothèse que la maison intelligente à toujours existé. La maison intelligente était le travail de l'architecte à travers l'intégration d'espaces de rangements, l'orientation du bâtiment pour une exposition au soleil optimale, un traitement paysager qui offre de l'ombre pendant les périodes de chaleurs ou encore l'utilisations intelligente de matériaux possédant une bonne inertie thermique. La maison intelligente est en sorte avant tous une optimisation parfaite de l'espace intérieur comme extérieur. Une maison intelligente c'est alors une maison bien pensé par un bon architecte.

On peut retrouver de nombreux exemples de ce type d'architectures intelligentes comme avec la maison héliodome¹ imaginé par Éric Wasser qui intègre une façade unique en son genre cherchant à bénéficier d'une exposition optimal tout au long de l'année grâce à sa forme si particulière.

¹ Maison imaginer par Eric Wasser



Figure 1 - L'Héliodome originel à Cosswiller, en Alsace

Dans le cadre du confort thermique c'était donc le rôle de l'architecte de comprendre l'environnement de sa construction pour que dès la planification du bâtiment, un niveau de confort minimum soit assuré à son client.

Aujourd'hui l'architecte doit concevoir ses logements à travers un nouveau prisme, apparu avec l'avènement de nouvelles technologies qui envahissent le monde de l'architecture. Notre définition des maisons intelligentes semble alors avoir évolué avec le temps et sans pour autant discréditer l'hypothèse qu'une maison intelligente n'est pas le produit d'ajout technologique mais le produit de la pensée d'un architecte, il semblerait que dans la pensée collective cette vision soit étonnée et que aujourd'hui une maison intelligente est intrinsèquement liée aux technologies qu'on lui intègre.

Cependant ce n'est pas forcément une mauvaise façon de penser, au final une maison intelligente ne peut-elle pas l'être grâce aux avancées et découvertes modernes ?

1.2. La maison intelligente moderne

Aujourd'hui quand on pense à la maison intelligente, on pense aux ordinateurs, aux micro-puces et maintenant plus que jamais à l'intelligence artificielle avec son avènement progressif.

On pourrait se demander pourquoi notre vision à évoluer et surtout pourquoi on semble oublier, du moins pour les non architectes, le sens premier d'un habitat intelligent.

Notre intérêt progressif pour ces nouvelles technologies est apparu avec les premières crises énergétique qui ont remis au centre du débat la nécessité de concevoir des bâtiments moins énergivores, plus respectueux de l'environnement qui les entoure, en contraste avec notre façon de concevoir dans les années trente et ce manque de considération qui a mené à construire tant de bâtiments dépourvus d'isolation efficace, d'économie d'espace et de sobriété dans le choix des matériaux de constructions.

L'intérêt premier de ces technologies c'est peut-être une plus grande facilité à intégrer leurs éléments aux seins des logements déjà existants. Comparé à une planification nécessaire on peut alors modifier un bâtiment « non intelligent » pour le rendre intelligent.

C'est dans les années 1980, qu'apparaissent les premiers concepts et réalisations d'habitat dit : intelligent dans le sens contemporain du terme.

C'est vers cette époque que la domotique fait sa grande apparition.

Mais c'est quoi la domotique ?

1.3. La domotique

Quand on parle de la domotique aujourd'hui, on a une image assez négative du sujet. Cela s'explique à travers l'histoire du domaine qui c'est concentré dans un premier temps sur des évolutions technologique plus que sur le besoin des habitants, s'aliénant alors une partie de la population qui rejette peut être le mot domotique plutôt que son idée, malgré une évolution (trop) tardive se concentrant enfin sur les besoins de l'habitants.

On peut donner plusieurs types de définitions à la domotique :

Nature	Auteurs	Définition
Définition technique	Akio Orihara, Nikken, Sekkei Co. Ltd	Immeuble qui réalise l'intégration de comforts, de sécurité, de productivité et d'économie grâce aux ressources les plus récentes de la technologie
Définition technique	FNB-FIEE-EDF-FNEE	Maison assurant un ensemble de services grâce à des systèmes réalisant plusieurs fonctions, et pouvant être connectés entre eux et à des réseaux internes et externes de communication
Définition sociotechnique	Ken Sakamura Maison TRON	Maison qui répond aux besoins nés de l'utilisation croissante d'appareils informatisés chez soi, et des styles de vie toujours plus diversifiés des habitants
Définition sociotechnique	CSTB	Bâtiment capable de fournir une technologie avancée de l'information et de répondre aux besoins en services de ses occupants actuels et à venir
Définition culturelle	M.B. Ullag Singapour	Conception architecturale néo- moderniste, donnant corps aux aspirations sociales, économiques, culturelles et technologiques de l'âge de l'information, et dotant les immeubles d'un cœur battant avec tous les signes des organismes vivants
Définition d'efficacité sociale	Lawrence Chin Singapour	Immeuble qui promeut effectivement et efficacement le degré de performance et de productivité requis par les occupants avec une flexibilité d'accueil pour de nouveaux besoins dans le futur

Définitions du terme domotique sous différentes approches (Cancellieri 1992, p.328)

L'habitat intelligent² se différencie notamment de la domotique³ par son approche de la données.

Ces premiers concepts ont été permis par la miniaturisation des technologie électronique et de l'essor de la domotique. Des maisons comme la Tron House⁴ à Tokyo au japon conçue dans les années 1988 par Ken Sakamura font office de figure de proue dans le milieu de la maison connecté et intelligente. La Tron House était un moyen de présenter le système TRON (The Realtime Operating system Nucleus), un système intégré au sein de la maison.



Figure 2 - vue extérieur de la Tron House par Ken Sakamura

La particularité de cette maison, c'est quelle intègre un total de 380 micro-processeurs qui, tel un réseau de cerveaux, travaillent ensemble dans la gestion de la maison et du confort de son utilisateur.

² habitat intelligent:

³ « Ensemble des techniques visant à intégrer à l'habitat tous les automatismes en matière de sécurité, de gestion de l'énergie, de communication, etc. » Définition selon le dictionnaire Larousse.

⁴ Première maison intelligente de Ken Sakamura

La force de cette maison c'est aussi sa capacité à pouvoir être contrôlée à travers un unique système centralisé.

D'ailleurs Ken Sakamura donne lui-même la définition de la maison intelligente d'après Cancellieri (Cancellieri, 1992). Il lui donne sa valeur par l'exclusion de certains paramètres :

« Une maison sera disqualifiée au regard du classement dans la catégorie des maisons intelligentes si :

- L'information ne peut pas circuler librement de l'intérieur de la maison vers le monde extérieur, et vice-versa (on parle aussi de maison communicante²);*
- Si la maison fonctionne avec des ordinateurs intégrés qui ne peuvent pas se parler entre eux ;*
- Si sa domotisation consiste en un « patchwork » de « gadgets » ;*
- Si elle est équipée avec des fonctions sophistiquées difficiles à utiliser ».»*

Dans la continuité de la Tron house, toujours Ken Sakamura réalisera quelques années plus tard *The Toyota dream house*⁵ en partenariat avec la société du même nom.

Cette fois-ci la particularité de cette maison se trouve dans sa gestion de l'énergie. Son intelligence vient de sa capacité à se servir de la batterie de sa voiture électrique en cas de coupure de courant. On comprend alors qu'une autre façon de penser l'habitat intelligent est à travers la résilience de ses systèmes.

⁵ Seconde maison intelligente de Ken Sakamura



Figure 3 - Toyota dream house de Ken Sakamura

À l'époque cet avancée est vu comme le futur de l'habitation et pourtant aujourd'hui en 2024, la maison intelligente fait toujours office d'exception plutôt que de norme, les architectes aussi bien que le reste de la population étant retissent à intégrer cette nouveauté à leur quotidien.

Cette échec de séduction du concept est assez bien présenté par Daniel Kaplan :

« Les premières incarnations des maisons intelligentes sont spectaculaires, mais dès que l'on rentre dedans, on est complètement glacé. C'est le dernier endroit où l'on a envie de vivre. »⁶

Le problème de la domotique c'est peut être son manque d'esthétisme plus que la difficulté des technologie quelle intègre.

⁶ Approche ascendante pour les maisons intelligentes, par Daniel Kaplan. Propos recueillis par Sabbah (Sabbah, 2010)

Pour autant si l'intégration de ces technologies semble compliquée à faire accepter, cela n'a pas empêché les grands groupes technologiques issus des GAFAM⁷ ou même d'autres laboratoires de développer le domaine. Ainsi on voit l'arrivée ces dernières années de d'objets intelligents interconnectés à travers des acteurs comme Google avec Matter ou Philips avec sa gamme Hue, objets qui ne sont plus œuvres de la domotique en elle-même, mais sa continuité : L'internet des objets.

1.4. L'internet des objets

Commençons par définir ce qu'est l'internet des objets ou IoT :

« L'IoT, ou l'internet des objets, désigne le processus de connexion d'objets physiques à internet, des objets du quotidien tels que les ampoules, aux dispositifs médicaux, appareils portables, appareils intelligents ou encore feux de circulation routière dans les villes intelligentes. »⁸

Dans cette définition on observe bien que contrairement à un objet physique, on fait référence à un système d'interconnexion des appareils.

C'est là qu'intervient le système ubiquitaire. Ce système, également appelé *persuasive computing* est un système constamment présent et ce partout dans notre environnement, et ce pour but de rendre omniprésente l'informatique et plus important encore de le faire de façon invisible. Le but d'un tel système, c'est de rendre l'informatique disponible à tout

⁷ GAFAM : Google Apple Facebook Amazon Microsoft

⁸ Définition selon Red Hat

moments mais de manière discrète qui n'empiète pas sur notre appréhension de l'espace.

L'internet des objets ou l'IoT met bien à profit ce système. L'IoT est aujourd'hui au cœur de l'habitat intelligent et sa particularité c'est justement sa capacité à pouvoir interagir avec les différents objets intégrés au logement. De cette manière un capteur n'est plus un capteur, c'est un membre d'un système, un système ubiquitaire.

Si la construction d'habitats intelligents de zéro ne s'est pas développée autant qu'on aurait pu l'espérer aux cours des dernières années, on a vu cependant l'expansion de l'IoT de manière générale.

2. L'Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle ou IA peut être décrite comme un ordinateur ayant pour but dans un premier temps de copier l'intelligence humaine puis dans un deuxième temps de la transcender. Œuvre des plus grands fantasmes au sein de la science fiction littéraire ou cinématographique, on la voit parfois décrite comme une utopie, à travers des œuvres comme *WALL-E*⁹ du studio Pixar en 2008, mais aussi parfois en dystopie comme dans l'une des plus grandes sagas de science fiction : *Dune*¹⁰, de Frank Herbert, où l'intelligence artificielle, devenue une menace, est bannie obligeant l'humanité à évoluer et prendre la place d'ordinateurs humains.

⁹ Film d'animation du studio Pixar sorti dans les années 2008

¹⁰ Œuvre de littérature publiée en 1965 par Frank Herbert

Cela reste cependant des oeuvres de sciences fictions; l'intelligence artificielle telle qu'elle existe aujourd'hui est loin encore de l'imaginaire que le public s'en fait.

2.1. Les différents types d'intelligence artificielle

Commençons par définir précisément ce qu'est l'intelligence artificielle, dans une démarche de curiosité j'ai demandé à ChatGPT (l'intelligence artificielle la plus développer du moment accessible au public) de donner sa définition en posant la question simple suivante :

C'est quoi l'intelligence artificielle ?

« L'intelligence artificielle (IA) est un domaine de l'informatique qui se concentre sur la création de systèmes capables d'effectuer des tâches qui, normalement, nécessitent une intelligence humaine. Ces tâches incluent la reconnaissance vocale, la compréhension du langage naturel, la prise de décision, la résolution de problèmes, l'apprentissage, et la perception visuelle. »¹¹

Cependant l'intelligence artificielle ne fonctionne pas sur un modèle unique. En réalité quand on utilise une IA aujourd'hui celle-ci est spécialisé et suis un certain protocole. De cette manière une IA générant des images n'aura pas les memes besoin ni le même protocole de fonctionnement qu'une IA cherchant à étudier les habitudes humaines par exemple.

¹¹ définition de l'intelligence artificielle donné par Chat GPT-4o le 15 mai 2024

Ainsi on peut donc présenter trois familles d'intelligence artificielle majeure :

L'intelligence artificielle étroite (ANI) : Il s'agit là de la plus commune, qui a été développée. Elle est aussi appelée intelligence artificielle faible car elle ne se spécialise que dans des paramètres très spécifiques et donc ne répond qu'à des questions précises (comme la reconnaissance vocale par exemple)

On trouve ensuite l'intelligence artificielle générale (AGI) : à l'inverse de la dernière, on parle ici d'intelligence artificielle forte; elle traite les données à un niveau supérieur, qui se rapproche de l'intelligence humaine.

Enfin la super intelligence artificielle (ASI) : celle-ci n'est pas développée, c'est pourtant celle que l'on retrouve dans la science fiction moderne. Elle a pour but de transcender l'espèce humaine

Aujourd'hui l'intelligence artificielle étroite (ANI) peut être retrouvée dans beaucoup d'exemple du quotidien : les voitures sans conducteur, les reconnaissance vocale et bien d'autres domaines. Cette I.A. possède des éléments assez intéressants pour la prédiction car spécialisée. On pourrait comparer une I.A. de voiture autonome reconnaissant un obstacle à une I.A. reconnaissant des phénomènes précis induisant certains types de réaction.

On peut également se poser la question de la pertinence d'utiliser une I.A. plus poussée dans le domaine comme une AGI. Bien qu'il s'agisse d'une I.A. ayant plus de capacité que son prédécesseur son emploi n'est pas forcément évident dans une telle situation. En effet l'AGI va plus loin que l'ANI car elle nécessite une machine pour effectuer des tâches intellectuelles proches de ce dont l'humain est capable. Il a alors une réflexion très proche de l'humain qui ne semble pas forcément nécessaire car il s'agit d'un sujet précis.

Ensuite au sein même de l'I.A. il faut comprendre comment les données sont traité. Pour cela il faut parler de machine learning.

Le machine learning qu'est ce que c'est ?

Le machine learning se réfère à la capacité d'un ordinateur, système, algorithme à apprendre est à s'adapter automatiquement d'après ses expériences sans le besoin de l'avoir programmer pour.

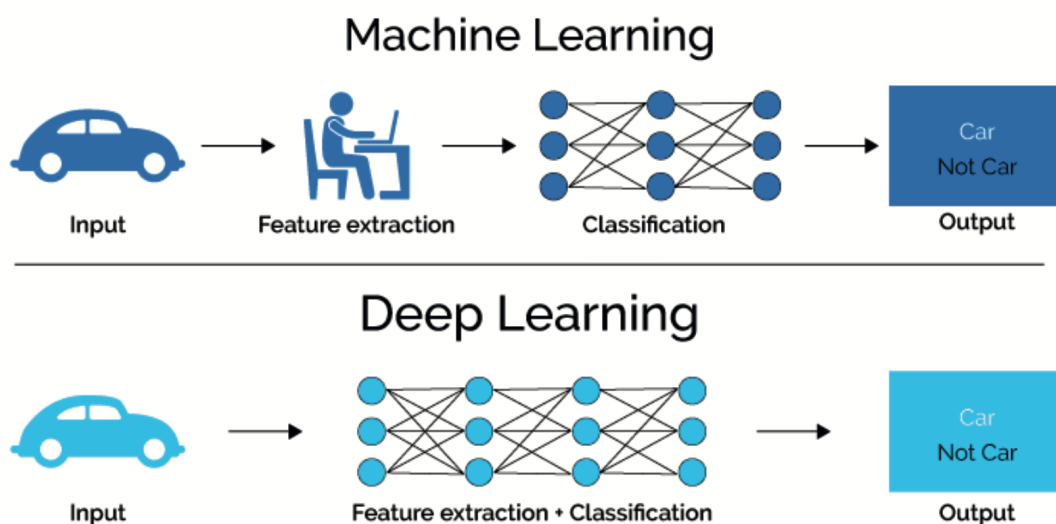


Figure 4 - différence machine learning et deep learning schématisé

Avec cette définition, on peut facilement comprendre la force d'un tel outil. Pourtant cela ne s'arrête pas là bien au contraire car on peut aller encore plus loin dans l'apprentissage avec le deep learning.

Qu'est ce que le deep learning ?

Le deep learning permet une évolution majeure par rapport au machine learning. Déjà il faut comprendre que le deep learning fait en soit parti du machine learning, la différence se trouve dans comment il traite des données. Un point notable sera sa capacité à se passer de correction humaine. En effet le deep learning sait de lui même comment corriger ses erreurs par la répétition du procédé. Ainsi en effectuer un nombre incalculable de fois la même action le programme pourra apprendre qu'est ce qui fonctionne et inversement et cela sans la moindre intervention humaine. L'autre différence majeure est la quantité de données à prendre en compte. Là où le machine learning analyse des quantités de données modérées mais le deep learning lui nécessite une quantité de données très importantes (pouvant être non organisé et très diverse).

On peut voir le deep learning comme une évolution du machine learning.

D'ailleurs dans l'architecture même du programme on peut retrouver des similarité avec la façon dont le cerveau humain est conçu, on parle ici d'un « artificial neural network ».

L'information passe à travers différentes couches d'algorithme de façon non linéaire (de même façon que les neurones de notre cerveau le ferait).

Ainsi on voit que pour le traitement de données on a là affaire à un outil d'une force considérable qui surpasse les capacités humaines. La force majeure de cet outil c'est cette capacité à traiter autant d'information dans un laps de temps réduit.

2.2. Intégrations des IA dans le logement

D'une certaine manière on peut se demander comment on intègre un tel outil au sein de nos logements. Au vu de l'historique des architectes qui ont bien trop souvent du mal à intégrer les nouvelles techniques et innovations dans leur processus de conception, comme avec l'apparition du CAD qui à remplacer le dessin à la main dans les années 1960, on est en droit de se demander si l'architecte ne prendra pas la mesure de l'importance de l'IA trop tard.

Pourtant l'IA à beaucoup d'application possible dans le logement. Elle peut servir de centralisation de tous nos objets connecté prenant une place d'interface avec l'homme répondant à ses besoins voir même les prévoyants.

Elle pourrait gérer de manière plus optimiser notre environnement : la qualité de l'air, arroser nos plantes et entretenir nos espaces de jardin, s'occuper de nos animaux. L'IA exprime également un fort potentiel dans la sécurité des logements, ayant la capacité d'analyser les potentiels cambriolages et de comprendre seul qu'il faut prévenir la police. Elle pourrait peut être même prédire quand une maintenance sera nécessaire nous permettant de prendre des mesures en avances, avant même l'apparition de quelconque problème.

Et bien évidemment elle pourrait avoir un impact sur notre confort et sa gestion

Mais déjà avant d'intégrer ce nouvelle outil il faudrait commencer par comprendre à quoi il fait face. Si l'IA peut avoir un impact sur le confort thermique des usagers il faut commencer par comprendre ce qu'est le confort de manière générale puis plus précisément le confort thermique en particulier.

Partie 2 : Atteindre le confort thermique

3. C'est quoi le confort ?

3.1. Definition confort

D'abord c'est quoi le confort ? Comment le définit-on ? Comment est-ce qu'on le mesure ?

Quand on y réfléchit, on a beau parler de confort de manière régulière, le définir précisément semble être paradoxalement beaucoup plus difficile qu'il n'y paraît. Quand on parle de confort on fait généralement référence à des sensations, des ressentis plutôt qu'une donnée précise provenant d'une quelconque échelle destinée à étudier des mesures. Le *Trésor de la Langue Française* (TFL)¹² parle de deux définitions du confort : « Ensemble des commodités matérielles qui procurent le bien-être » et « Tout ce qui assure le bien-être de l'esprit et sa tranquillité ».

Ces deux définitions sont en lien avec le bien-être d'un individu mais de deux façons différentes : l'une à travers une compréhension physique de ce qui l'entoure et l'autre à travers un ressenti, une appréciation de l'ordre psychologique personnelle.

Quand on parle de confort au niveau d'un bâtiment c'est généralement au confort thermique qu'on fait référence pour cela. Encore une fois deux définitions sont données la plupart du temps. Une de Fanger :

¹² atilf.atilf.fr

«Etat d'esprit exprimant la satisfaction de son environnement. Le sujet ne peut pas dire si il veut avoir plus froid ou plus chaud. »¹³

Givoni lui propose une définition plus cartésienne pour comprendre le confort thermique :

« Conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont à un niveau d'activité minimum ». ¹⁴

3.2. La réglementation thermique

Le confort thermique est intrinsèquement lié aux réglementation qui l'accompagne. En France la réglementation a souvent évolué aux fil du dernier siècle avec pour but à chaque fois de gagner en performance par rapport à la consommation.

Nom	Objectif sur la consommation énergétique	Période d'application
RT1974	-25% par rapport aux précédentes normes	1976 à 1981
RT1982	-20% par rapport à la RT1974	1982 à 1989
RT1988	Inclusion des bâtiments à usage tertiaire	1990 à 1999
RT2000	-20% par rapport à la RT1988 pour le résidentiel -40% par rapport à la RT1988 pour le tertiaire	2001 à 2006
RT2005	-15% par rapport à la RT2000	Depuis 2006
RT2012	Objectif de 50 kWh/m ² /an	2013 à 2020
RE2020	-Changement de méthode de calcul -Prise en compte et favorisation des énergies renouvelables	Depuis 2020

Présentation des différentes réglementations thermiques

¹³ (Fanger, 1973)

¹⁴ (Givoni et al., 1978)

Quand on regarde l'évolution des réglementation, on remarque cette volonté à chaque nouvelle norme de vouloir baisser la consommation énergétique.

Le point positif à trouver dedans c'est que la réglementation thermique intègre d'elle même la notion d'écologie et donc de développement durable. Les règles cherchent à nous faire construire pour une architecture pérenne.

Ces réglementation sont un outil essentiel pour l'architecte, qui lui donne un point référence à atteindre lorsqu'il conçoit un bâtiment.

Cependant les règlementation ne font pas office de point de référence quand on vient à parler du confort.

3.3. Le confort thermique

Si les réglementation concerne en partie surtout l'architecte, l'habitant lui a un contrôle plus libre de la chaleur de son logement. Si aucune réglementation lui impose de chauffer ses pièces à une certaine température, il existe des recommandations sur comment chauffer son logement. Ces recommandation varie pour chaque fonctions au sein de la maison ou née l'appartement, ainsi une pièce de vie n'aura pas les mêmes recommandation qu'une pièce de passage.

S'il est en effet pratique d'avoir les recommandations idéals il n'en reste pas moins qu'elles s'appuient sur une médiane et que en réalité le confort de chacun varie en fonction de nombreux facteurs et que par conséquent il est normal que chaque habitant s'adapte au mieux à ces recommandations.

Pour autant nous architectes devons avoir un moyen de mesurer ce confort afin de mieux traiter nos bâtiments et leur problématiques.

Pour cela le modèle d'étude du confort thermique de Fanger, personnalité très reconnu pour ses travaux sur le confort thermique, semble un bon outil pour mieux comprendre le sujet.

Son modèle sert à déterminer le PPD (« *Predicted Percentage of Dissatisfied* ») et le PMV (« *Predicted Mean Vote* »).

La première équation du modèle de Fanger a pour but de trouver l'équilibre du bilan thermique de l'humain après les échanges de chaleur avec son environnement.

$$S = M \pm P \pm C \pm R \pm E$$

S : stock de chaleur

M : métabolisme énergétique lié au travail et au métabolisme de base;

P : échanges thermiques par conduction ;

C : échanges thermiques par convection

R : échanges thermiques par rayonnement

E : échanges thermiques par évaporation

Grace au bilan thermique humain, une deuxième équation de confort est définie par Fanger. Les unités de cette équation, comme le *met* ou le *clo*, sont trouvées dans des tables. On peut retrouver les détails de calcul dans d'autres communications (Deval, 1984; Morel et al., 2008)

Fanger pose l'hypothèse suivante : si $S=0$ alors on atteint un équilibre thermique entre l'homme et son environnement.

$$f(M, I_{cl}, v, t_r, t_a, P_w) = S$$

M : taux métabolique (en met)

I_{cl} : indice d'habillement (en clo) v

v : vitesse de l'air (en m.s⁻¹)

t_r : température radiante moyenne (°C)

t_a : température ambiante de l'air (°C)

P_w : stock de vapeur d'eau dans l'air ambiant (Pa)

S : stock de chaleur (venant de l'équation précédente)

Enfin, après des études en chambre climatique, Fanger en a déduit un indice de confort : le PMV. Cette indice correspond à la sensation de confort chez différentes personnes pour une même ambiance thermique.

$$PMV = [0,303.exp(-0,036.M) + 0,028] . S$$

M : taux métabolique

S : résidu du bilan thermique

Au final on peut comparer le résultat obtenu avec la sensation thermique ressenti grâce au tableau ci dessous :

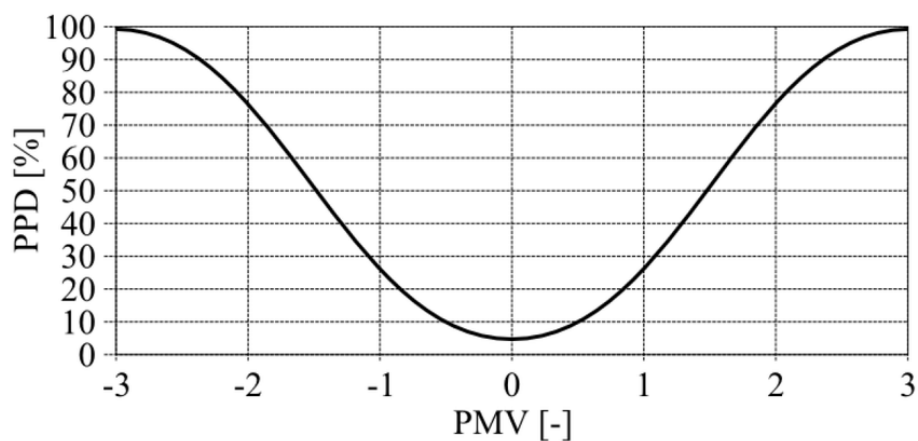
PMV	Sensation thermique
3	Très chaud
2	Chaud
1	Tiède
0	Neutre
-1	Frais
-2	Froid
-3	Très froid

Ressentie thermiques grâce à
l'indice PMV

Une fois le PMV obtenu, on peut calculer le PDD grâce à l'équation suivante :

$$PPD = 100 - 95.exp[-(0,03353.PMV^4 + 0,2179.PMV^2)]$$

Avec la courbe du PPD, Fanger montre deux éléments qu'il pense associé au confort thermique. Que la satisfaction des personnes par rapport à une ambiance thermique est symétrique, les gens étant autant gênés par le froid que par le chaud. Et que il y a toujours une faible partie des gens, 5%, qui sont mécontent de l'ambiance thermique.



Courbe du PPD en fonction du PMV

Ces deux indices PMV et PPD sont pourtant critiqués (Van Hoof, 2008). Certains chercheurs sont en désaccord avec le facteur symétrique du modèle ce qui poussent la création d'autres modèles non symétriques. Une autre critique est que le modèle de Fanger ne prend pas en compte l'inertie thermique qui brouille les mesures en cas de variations thermiques fréquentes (Talotte et *al.*, 2006)

En conclusion le modèle de Fanger bien que référence pour beaucoup présente des désaccords qui ont mené à la création de nouveaux modèles dits adaptatifs. Dans ce cadre on peut donc assumer que de nouvelles expériences sur le sujet ont pu nous permettre de tirer de nouvelles conclusions sur la perception du confort thermique.

4. Comprendre les habitudes

Afin de mieux comprendre comment les nouvelles technologies influent sur notre confort et comment l'utilisateur répond à leur intégration j'ai choisi de prendre en exemple de l'expérience effectuée à plusieurs années d'intervalle, une en Amérique et une en France, afin de pouvoir comparer les résultats et en conclure l'efficacité ou non des technologies pour notre confort.

4.1. Etude de cas PlaceLab MIT

L'expérience PlaceLab conduite par le MIT¹⁵ en 2003 avait pour but d'étudier les technologies ubiquistes au sein d'un logement standard. On voulait

¹⁵ Massachusetts Institute of Technology

mieux les interactions entre les usagers et les technologies de maisons connectées et comment ces interactions peuvent influencer notre gestion des ressources et nos comportements.

L'expérience prend la forme d'un appartement entièrement équipé de capteurs qui collectent des données sur ses occupants. Ceux-ci sont des volontaires qui ont accepté de vivre comme dans un appartement classique, sans interaction directe avec l'équipe de chercheurs

Les chercheurs ont mis en place au sein de ce « laboratoire » de nombreux capteurs environnementaux mais aussi des interfaces utilisateur qui se voulaient innovante pour l'époque ou encore des systèmes de contrôles automatiques.

Aux niveaux des données collecté, ils se sont concentrés sur les données fines des interactions entre les occupants et les technologie intégré à l'appartement. Ils ont pu alors mesurer les activités, la façons dont les occupants répondaient aux technologie, à leur environnement et plus encore comment ils s'ajustaient à celui-ci.

Au final l'expérience du PlaceLab du MIT a permis de d'obtenir de nombreuses conclusions sur l'importance de l'intégration des technologie de systèmes ubiquistes dans les logements intelligents.

Les conclusions majeurs trouvé étant :

Comment les comportements des usagers sont influencés par les environnement technologique. L'étude démontre que les comportements des occupants sont fortement influencés par la présence de technologies dans le logements ou plus généralement dans l'environnement domestique. Les

nombreux capteurs ont permis la mesure et l'analyse des interactions humaines avec les technologies du quotidien, nous donnant des points de références essentiels dans la compréhension des habitudes et les préférences des usagers.

Dans un deuxième temps les chercheurs ont pu évaluer l'efficacité de ces technologies dans une période de temps plus longue, et en ont conclu que certaines technologies, pourtant bénéfiques sur le court terme, se révélaient parfois compliquées à utiliser sur le long terme sans ajustements, rendant leur intégration compliquée aux usagers.

Dans un troisième temps, les chercheurs ont pu observer une importante amélioration de la santé des usagers et de la gestion des ressources grâce aux technologies mises en place dans le PlaceLab. Les interfaces utilisateur pouvant éduquer les personnes sur les comportements à adopter pour une meilleure gestion de l'énergie dans le logement ou donner des conseils sur une pratique du sport de manière plus régulière.

Une autre observation intéressante, est la capacité, pour la majorité des usagers, à pouvoir s'adapter facilement à un environnement connecté et à pouvoir se l'approprier. Ce point est d'une importance cruciale dans les conclusions de l'étude car c'est une condition essentielle pour pouvoir généraliser l'intégration de technologies ubiquistes dans les futurs logements sans dérouter les occupants.

En résumé, l'expérience PlaceLab nous a permis d'accumuler des connaissances approfondies sur les interactions entre l'humain et la machine, nous permettant de développer ces nouvelles interfaces utilisateurs plus

efficaces et intuitive pour l'utilisateur. Or une interface simplifiée est synonyme d'une plus grande aisance dans le contrôle d'environnement connectés complexes, participant à rendre ces technologies encore plus accessibles.

4.2. Etude de cas Domus Mathieu Gallissot

Pour mieux comprendre le fonctionnement de tels systèmes je vais prendre en référence l'étude de l'appartement Domus effectué par Mathieu Gallissot¹⁶. Il s'agit d'un prototype d'appartement d'une quarantaine de mètres carrés mis en place par l'institut Carnot LSI¹⁷.

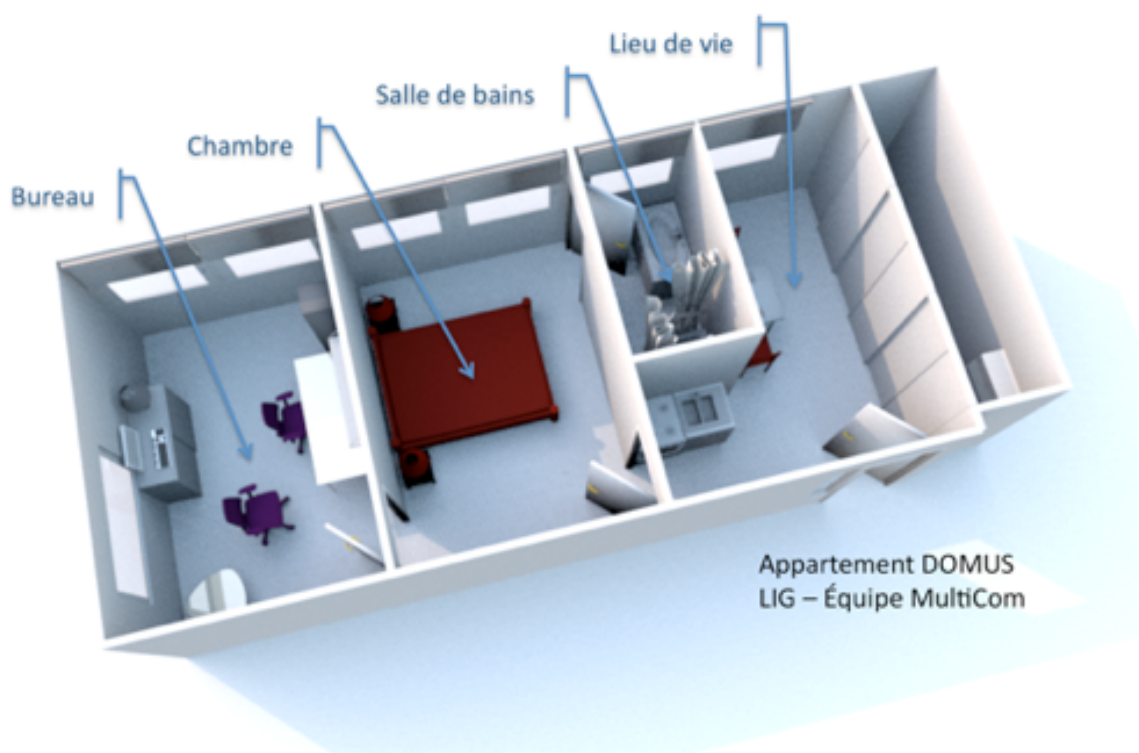


Figure 5 - Vue 3D de l'appartement Domus

¹⁶ Mathieu Gallissot. Modéliser le concept de confort dans un habitat intelligent : du multisensoriel au comportement. Mathématiques générales [math.GM]. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GREN018 . tel-00738342

¹⁷ <http://www.carnot-lsi.com>

L'objectif de l'expérience comme décrite par Mathieu Gallissot c'est :

« La raison d'être de l'appartement Domus est de fournir un environnement propice à l'évaluation des usages dans l'habitat intelligents »¹⁸

De cette manière obtenir une meilleur perception du ressentie du confort, comment les occupants s'adapte à l'espace, etc.

Il s'agit d'un appartement de trois pièces : une cuisine/salle à manger, une chambre avec salle de bain et d'un bureau. Il est précisé que l'appartement est meublé avec du mobilier standard afin qu'il soit au plus proche d'un appartement « classique ».

Cependant si d'aspect Domus ressemble à un appartement classique, celui-ci est équipé de nombreux capteurs et autres systèmes intelligents de domotiques.

L'expérience a été effectuer sur une période de trois ans entre 2008 et 2011, implémentant de nouvelles technologie au fur et à mesure de la progression de l'expérience.

Pendant ces trois années Mathieu Gallissot a explorer l'impact que les technologies avancées, comme les systèmes ubiquitaire et l'intelligence artificielle ont sur la perception et la gestion du confort.

¹⁸ Page 83 thèse mathieu gallissot

L'un des points importants de l'étude était de pouvoir étudier les effets multisensoriels sur le confort des habitants de Domus à l'aide des capteurs présents dans l'appartement.

Après l'observation de l'expérience on peut observer trois points d'avancées importants tirés de l'expérience Domus de Mathieu Gallissot.

En premier, l'importance de l'interopérabilité des systèmes. Pour avoir un bon fonctionnement au sein de l'habitation intelligente il faut créer un *middleware*¹⁹ ayant la capacité de contrôler l'intégralité d'un environnement intelligent qui se charge de gérer l'hétérogénéité des objets connectés.

Dans un deuxième temps, on observe les bénéfices du confort adaptatif. Grâce à une densité croissante des capteurs et donc de la prise d'informations, il a été possible de récolter des informations plus précises concernant aussi bien, l'environnement que le comportement des usagers. On observe ainsi un confort bien plus personnalisé.

Enfin, on observe l'importance des effets multisensoriels. Il a été observé que les effets sensoriels croisés, comme les différences de la température des ampoules, ont une influence sur la perception thermique des usagers, et donc sur le ressenti de leur confort. Il semble alors que le confort soit multisensoriel rendant plus complexe le traitement du confort à travers un seul facteur.

Ces résultats contribuent certes à la définition de nouveaux outils pour mesurer et améliorer le confort dans les habitats intelligents cependant Mathieu

¹⁹ logiciel tiers qui crée un réseau d'échange d'informations entre différentes applications informatiques.

Gallissot lui même donne un certain problème avec l'étude de l'appartement Domus :

« Afin de préserver l'intégrité du bâti, il n'a pas été possible d'avoir une évacuation d'eaux usées, ce qui implique que l'appartement n'a pas de toilettes. [...] Enfin, la politique de gestion thermique du bâtiment exclut toute gestion individualisée, ou par zones. Il n'est donc pas possible d'intégrer une gestion thermique dédiée de l'appartement, qui souffre des malfaçons à l'échelle du bâtiment (en particulier la non-mise en service du système de réfrigération « free-cooling » pour les périodes chaudes). »²⁰

4.3. Comparaison des résultats

Si je veux comparer les conclusions de ces deux études, je dois d'abord dire que même si elles avaient un sujet central commun, les deux expériences n'avait pas le même objectif. Là où le Placelab voulait surtout voir la capacité d'adaptation d'un humain à un système ubiquiste et à la façon dont il répond à un environnement rempli de technologie qu'il ne connaît pas, l'appartement Domus lui c'est surtout attarder sur la compréhension des habitudes d'un habitants et du ressenti de son confort.

Et ce que je retiens avant tous pourtant de ces études c'est le facteur multisensoriels du confort, car si l'architecte ne peut pas forcément lutter contre la force qu'apporte les nouvelles technologie dans le confort thermique, il a un talent pour dessiner l'espace. Or si la perception spatial et des des couleurs est un facteur qui contribue au ressenti du confort thermique, les technologies ne

²⁰ Page 104 thèse Mathieu Gallissot

sont pas encore en mesure de concurrencer l'architecte sur la création d'un environnement spatial. L'IA le sera peut être mais pas le mode d'IA qui nous intéresse aujourd'hui.

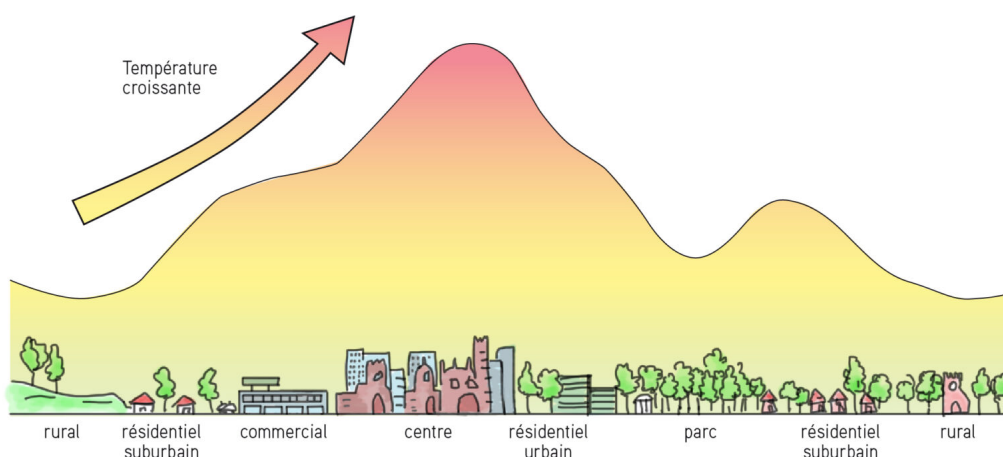
En attendant parmi toutes ces conclusions on peut se demander comment les intégrer dans notre quotidien et le différent impact que ces technologies peuvent avoir selon l'échelle du lieu auquel elles sont intégrées.

5. Les différentes échelles du confort

5.1. L'échelle de la ville

A l'échelle de la ville le confort est déjà présent et c'est d'ailleurs un facteur essentiel pour le bien être des habitants. Si on pense évidemment immédiatement aux confort apporté par le mobilier urbain ou par les aménagement, on oublie facilement les systèmes qui apportent un confort thermique.

Pour garantir le confort thermique il faut pouvoir maintenir des températures agréables stable et ce tout au long de l'année malgré les variations dû au changements de saisons et des « micro climat » créés par les ilot de chaleurs.



Heureusement il est possible d'influencer le confort thermique déjà à l'échelle urbaine. On peut jouer sur la densité du bâti, les types matériaux utilisés, la présence ou non de végétation créant des zones d'ombrages ou encore sur la perméabilité des sols permettant une meilleure absorption et maintien de l'humidité à l'inverse du béton ou du bitume qui ont tendance à retenir la chaleur et la rendre par inertie la nuit. L'importance d'avoir de la planification urbaine et de la régulation des circulations est également importante car bien effectuée, elle favorise une ventilation naturelle.

C'est d'autant plus important d'avoir un contrôle sur la chaleur pendant l'été, car par exemple dans une grande ville comme Paris, qui ne possède que très peu de logements climatisés, la vie peut être invivable pour beaucoup de personnes habitants des logements mal isolés ou subissant la chaleur sous les toits.

Bien sûr l'architecte a aussi une incidence sur ces questions en plus de l'urbaniste. La création de bâtiments avec des toitures végétalisées peuvent favoriser une meilleure absorption de la chaleur mais joue aussi sur le facteur de l'isolation des toits proposant donc deux avantages avec une seule solution.

De la même manière un mur végétalisé peut offrir les mêmes bénéfices que pour le toit.

Toujours sur le choix des matériaux, l'utilisation de matériaux réfléchissants en façade et sur les toits permet de réduire l'absorption de la chaleur du soleil.

Le choix des couleurs de nos bâtiments impose également, des couleurs claires absorbent moins la chaleur du soleil au contraire des couleurs sombres qui auront tendance à amplifier l'effet de chaleur en la stockant.

Evidemment dès la construction l'architecte peut prévoir l'orientation solaire et l'exposition au vent qui souffle généralement dans un sens dû au schéma météorologique.

La présence de balcons ou d'auvents faisant office de pare-soleil permet aussi d'apporter des zones d'ombrages dans les appartements, nous protégeant de l'exposition directe.

Enfin, une gestion et une récupération optimisées des eaux de pluies peuvent aider à créer une plus grande fraîcheur à travers l'humidité, de cette manière intégrer des fontaines ou même des miroirs d'eau comme à Bordeaux apporte de la fraîcheur tout en réfléchissant le soleil.



Figure 7 - Miroir d'eau Dans la ville de Bordeaux, France

Donc en fait pour améliorer le confort thermique à l'échelle de la ville il faut avoir une approche multidisciplinaire du sujet, regroupant l'urbanisme, l'architecture ou encore l'écologie de manière générale.

Seulement alors on peut avoir ces différents corps de métiers proposer des solutions efficaces issues de leur collaboration.

A ne pas oublier tout de même que les solutions proposées varient grandement avec le contexte géographique, une ville d'un pays nordique ne pouvant

bénéficier des mêmes solutions qu'une ville en Amérique du Sud, mais aussi avec le contexte culturelle, qui dictent un certain design afin de rester encore avec l'héritage historique de la ville (aspect esthétique comme sauvegarde de lieu historique dans un état d'origine).

Au final on voit qu'il existe déjà de nombreuses solutions à cette échelle qui ne nécessitent pas l'intervention de nouvelles technologies pour maintenir un certain confort thermique. Bien sur on pourrait quand même s'en servir, mais pour le moment, l'échelle de la ville fait appelle à des technologies qui servent d'autres dessein que le confort thermique. Sans trop rentrer dans le sujet la smart City est une évolution de la ville qui repose sur ces nouvelles technologies et qui à une utilité certaine dans l'optimisation des transports une meilleurs compréhension de l'espaces ou encore une meilleur sécurité au sein de la ville.

Mais quand on en vient au confort thermique c'est à une échelle plus petite que l'IA et autres capteurs semble être tellement exploité à leur plein potentiel.

5.2. L'échelle du logement

De la même manière le travail de l'architecte à évolué avec l'apparition de nouvelles méthodes de chauffage. Là où dans le passé un logement était généralement orienté autour d'une cheminer centrale qui justifié alors la fonction de lieu partagé d'un séjour, le développement du chauffage centralisé à permit de redéfinir la disposition architecturale des pièces d'un logement.

De la même manière l'apparition de la climatisation a eut un impact sur nos logements. On pourrait faire un parallèle avec le confort apporter par

l'avènement de la chasse d'eau, comme en parle Roger-Henri Guerrand dans le numéro mensuel du mars 1982 de *L'Histoire*²¹, qui fut après une période d'acceptation l'une des plus grande avancée en terme de confort au sein de nos logements. La climatisation et son impacte ont provoquer un changement dans la mentalité de la population. Jusqu'ici lorsque que les chaleurs augmenté en été, les habitants avaient conscience de la nécessité de devoir fermer les volets ou les rideaux pour préserver un environnement habitable vivable. Or avec l'apparition de la climatisation, cette connaissance, ce reflex, semble s'être perdu et aujourd'hui un américain qui à grandi avec la possibilité de rafraîchir son logement d'un « clic » se voit complètement perdu lorsqu'il arrive à Paris en été sans en avoir la possibilité.

Mais alors est ce que l'apport de nouvelles technologies, bien que bénéfique d'un coté, ne serait pas en réalité une fin de notre intelligence dans l'appréhension de l'espace? L'humain cédant à un confort mécanique et artificialisé perdrait il ses capacité à agir sur son environnement?

Pour re-citer l'une des conclusions de l'expérience Placelab, certaine technologies avantageuses à court terme s'avèrent être très mauvaise sur le long terme. Alors est ce que l'intégration de la technologie tout court ne serais pas nocif sur le long terme pour le bon fonctionnement du confort dans le logement ?

Débarrasser de certaines contraintes, nous architectes, pouvons maintenant concevoir des bâtiments qui peuvent réguler leur température tout au long de l'année sans avoir besoin de prendre des mesures particulière d'orientations solaire, d'aération, d'ombrage. Maintenant chaque pièce peut disposer d'une température idéal et cela peut importe son positionnement dans le logement.

²¹ Magazine l'Histoire, <https://www.lhistoire.fr/petite-histoire-du-quotidien-lavènement-de-la-chasse-deau>

5.3. L'échelle de la pièce

De cette manière on est arrivé aujourd'hui en 2024, et même depuis quelques années d'ailleurs, à un confort qui se veut sur mesure pour chaque pièces.

Pour cela on se sert d'un chauffage qui est compartimenté par pièce et qui permet d'avoir des variations de plusieurs degré d'une pièce à une autre.

L'intérêt étant de suivre les recommandation optimal de température pour chaque pièces tout en ayant la possibilité de l'ajuster à nos besoins.

Ce système est performant et fonctionne relativement bien avec pour inconvénient majeur la dépense énergétique.

Pour autant même à cette échelle l'implémentation de technologie ne me parait pas nécessaire

5.4. l'échelle individuelle

L'échelle individuelle, c'est l'échelle de demain, l'échelle pour laquelle l'IA peut briller, permis par les nombreuses avancées technologique et de compréhension des habitudes là où l'architecte seul ne peut offrir une réponse satisfaisante.

Bien que pas encore en réellement en place, on voit que avec la façon dont peuvent être gérer des capteurs aux sein d'une habitation comme Domus ou le PlaceLab, on a aujourd'hui moyen de différencier qui est qui dans l'habitation.

Maintenant si c'est mit en commun avec les système de chauffage déjà existant qui permettent de relever les variations de température dans une même pièce il serait possible, théoriquement, d'établir un profil pour chaque « utilisateur » du logement et ainsi permettre pour deux personnes différentes, ayant des

ressentis différents du confort thermiques, d'avoir orienter dans une zone autour d'eux strictement avec un confort thermique ajusté à leur profil.

Mais de telles nouvelles solutions soulève la question de la place de l'architecte. Si nous sommes en capacité de produire un espace dit « adaptatif », à t'on encore besoin de dessiner des espaces intelligents.

Qu'elle est la valeur ajouter de l'architecte? Est-ce que cette technologie est annonciatrice de notre remplacement?

Et bien pas complètement parce que comme le montre Mathieu Gallissot dans Domus, le confort suis un facteur multisensoriels et c'est peut être là le grand problème des technologies. Une maison remplie de capteurs en aura certain qui seront visible pour l'occupant. Et consciemment ou non, quand l'humain se sait observé il agit différemment , il doit penser à ses actions. On est donc alors toujours dans une démarche de réflexion, s'éloignant d'une forme de confort et par conséquence du confort de manière générale.

Au final ce que je comprend c'est que l'intégration de capteurs et de nouvelles technologies semble avoir des bénéfices certes, mais également de nombreux désavantages. Le travail qu'il faut faire aujourd'hui c'est peut être un travail décisionnaire avant tous. Et pour faire cette décisions il faut comprendre qu'il peut exister d'autre solutions qui ne repose pas sur la technologie.

Partie 3 : Le confort thermique sans électronique

Cependant il est tout de même permis de se poser la question de la nécessité d'un confort individuel. Bien qu'on ne puisse pas stopper le progrès technologique on peut se demander s'il va dans le bon sens. Avoir des maisons reposant sur l'IA, cela signifie avoir des maisons remplies de capteurs et au de la des risque pour notre vie privée, le problème qui me semble important c'est l'obsolescence de ces dit capteurs. Car si on peut justifier leur utilité et démontre leur impact faible en terme de pollution et de consommation énergétique, avoir un capteur c'est avoir une chance de devoir le remplacer un jour, alors quand on parle de centaines de capteurs par foyer la question devient importante. Les propriétaire seront ils prêt a répondre aux besoins économique d'un changement de matérielles et à en prendre le temps.

Il ne faut pas pour autant sacrifier le confort par peur mais regarder d'autre solutions.

D'une certaine manière à t'on besoin d'un confort individualisé? Les solutions à l'échelle de la pièce ne serait elle pas suffisante surtout avec les pénurie de matériaux ?

6. Les solutions passives antiques

Heureusement des solutions qui ne nécessite pas de capteurs il en existe et ça depuis des millénaire d'ailleurs.

6.1. Les bâdgirs perses

Une des solutions passives de climatisations qui me fascine le plus c'est sûrement les bâdgirs perses. Ces « tours à vent » sont des éléments architecturaux traditionnels notamment utilisés dans la région de L'Iran, dans des climats arides et souffrant de fortes chaleurs. Le génie de leur conception c'est d'exploiter la force du vent pour rafraîchir l'intérieur des bâtiments et cela sans aucune interventions mécaniques ou humaines.

On peut nommer les badgirs de la ville de Yazd en Iran, où l'architecture traditionnelle les intègre systématiquement, créant un paysage urbain unique.



Figure 8 - Les « attrape-vent » de la ville de Yazd en Iran
Crédit : Hasan Almasi

Pour fonctionner un bâdgir a besoin du vent, celui-ci est capté par de grandes structures verticales généralement carré qui s'étend au dessus du bâtiment, grâce à des ouvertures orientées vers les directions dominantes du vent.

Lorsque le vent s'engouffre, l'air est dirigé au bas du bâtiment remplaçant l'air chaud présent qui sans autre choix va monter dans le bâdgir s'échappant par une seconde ouverture.

Les bâdgirs se servent également d'un effet physique : l'effet de cheminée inversée, qui lorsque l'air extérieur est plus froid que l'air intérieur va influencer l'air

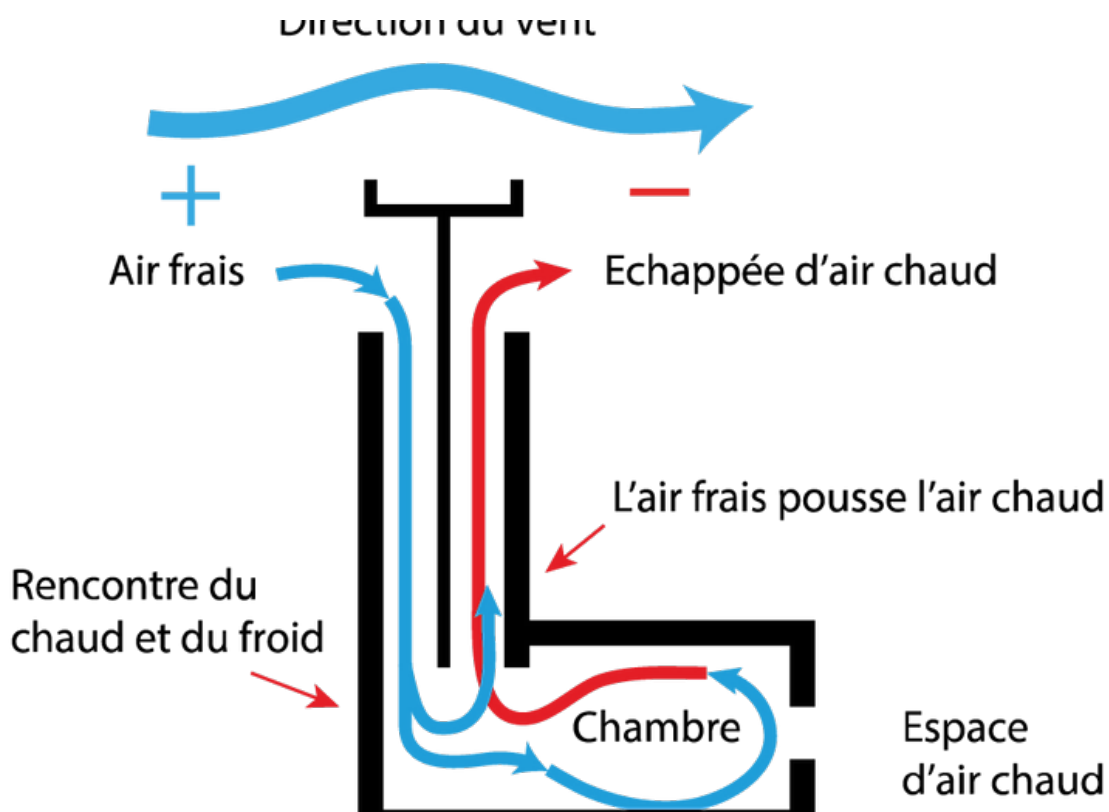


Figure 9 - Schéma de principe de fonctionnement du bâdgir

chaud, plus dense que l'air froid, et va le faire monter naturellement jusqu'à ce qu'il soit expulsé, créant un appel d'air par la même occasions aspirant l'air plus froid de l'extérieur par les niveaux inférieurs du bâtiment.

Pour accentuer encore plus la régulation thermique dans certains cas les bâdgirs sont reliés à un ganat. Le ganat c'est un système de canaux souterrains. De cette manière l'air passant au-dessus des ouvertures ganat est refroidi par l'évaporation de l'eau avant de pénétrer dans le bâtiment jouant encore plus sur le confort thermique intérieur.

D'un point de vue plus architecturale les bâdgirs sont construits en briques de terre crue la plupart du temps, un matériau local qui possède d'excellentes propriétés thermiques.

Si le bâdgir est construit à la verticale c'est parce que sa hauteur est cruciale pour attraper les vents qui sont toujours plus forts en hauteur. Certains peuvent atteindre jusqu'à 30 mètres.

Il existe deux grands types de bâdgirs : Les monofaces et les multifaces.

Dans la version monoface, le bâdgir a une ouverture unique qui est orientée vers la direction dominante du vent.

Dans sa version multiface, le bâdgir possède plusieurs ouvertures sur plusieurs faces. Il capte les vents de plusieurs directions. Ce type de bâdgir est généralement plus présent dans les régions où il n'y a pas de direction dominante du vent.

Pour conclure on peut dire que le bâdgir représentait déjà une solution architecturale efficace et écologique, s'appuyant sur des principes simples de physique créant une meilleure régulation thermique au sein du bâtiment. Leur conception montre que l'architecte avait depuis longtemps une connaissance

approfondie des méthodes de contrôle thermique et cela sans la présence d'éléments mécaniques.

Aujourd'hui encore certain architectes s'inspire de ces méthodes traditionnelles, prouvant qu'il est possible pour l'architecte de se passer (dans certain cas) des technologie moderne quand il conçoit les bâtiments d'aujourd'hui

6.2. Le puit canadien

Un autre système hérité des architectes et ingénieurs antique, c'est le puit canadien, ou puit provençal. Il s'agit d'un système géothermique passif qui s'appuie sur la température stable du sol pour réchauffer (dans le cas du puit canadien) ou rafraichir (dans le cas du puit provençal) l'air pénétrant dans un bâtiment (le système reste le même pour les deux types de puit). Ce système a l'avantage d'avoir une impact très faible au niveau de l'environnement grâce à son efficacité énergétique.

Chose importante à prendre en compte, le puit canadien n'est pas un système de chauffage mais un système de ventilation, il agit en parallèle pour soulager le besoin de chauffage trop important (ou de refroidissement en été).

Cette « technologie » était déjà connu par les romains pendant l'antiquité sous un autre nom, celui du puit romain.

Le fonctionnement de ce dispositif repose sur le principe de l'échange thermique de l'air extérieur et du sol. Pendant l'hiver l'air passant par des conduit enterré dans le sol sol est réchauffé tandis qu'il est refroidi pendant

l'été. Ce phénomène est rendu possible grâce à la température du sol qui reste relativement constante tout au long de l'année à partir d'une certaine profondeur, généralement entre 1,5 et 3 mètres.

La performance du dispositif est influencé par plusieurs facteurs.

La nature du sol (sa conductivité thermique) influence l'efficacité de l'échange thermique. Un sol argileux, par exemple, a une meilleure conductivité thermique comparé à un sol sableux.

La profondeur à laquelle on enterre les conduits agit également sur l'efficacité. Il est important de trouver la profondeur optimale pour avoir une constance dans l'efficacité travers les saison tout au long de l'année.

Enfin le débit de l'air, donc le diamètre des conduits doit être choisi minutieusement pour avoir un bon échange thermique.

Pour conclure on peut dire que ce type de solution de ventilation passif est hautement efficace et durable pour une gestion thermique optimale des logements.

7. Les solutions passives moderne

7.1. La naturhus

Ayant effectué un Erasmus en Finlande pendant mon année de master 1 j'ai été exposé aux températures extrême que subissent les pays nordiques chaque hiver avec des température atteignant facilement les -40 C°. Dans le

cadre de cette année universitaire j'ai pu découvrir les solutions de chauffages et de confort thermique misent en place dans ces pays et j'ai notamment fais la découverte du principe du Naturhus.

C'est quoi un « Naturhus »?

Un Naturhus (maison naturelle en français) est un concept de maison conçu dans les années 1970 en Suède ayant pour but de construire une maison en symbiose avec la nature pouvait être autosuffisante. Elle offre des bénéfices en terme de développement durable et de chauffage passif. La particularité de ces maisons, c'est quelles sont construites sous une serre leur donnant cette aspect esthétique si particulier et surtout leur capacité à auto réguler la température intérieur.

L'une de ces maisons si particulière est le Naturhus de l'architecte suédois Bengt Warne qui fut à l'origine de la toute première maison de ce genre.

Si on étudie le cas de la maison de Bengt Warne plus en détail on peut relever plusieurs caractéristiques.

La première, plutôt évidente c'est son enveloppe de verre. Celle-ci crée un microclimat qui protège la maison contre les température extreme de l'hiver suédois grâce à l'effet de serre, créant par la même occasions un jardins intérieur protégé contre les intempéries extérieurs. La présence de cette serre a un effet positif sur la durée de vie des plantes présentes, permettant une agriculture urbaine de fruit, légumes et autres herbes permettant une



Figure 10 - Naturhus de Bengt Warne en Suède

nourriture biologique tout au long de l'année, chose exceptionnel et sinon impossible dans un pays avec un climat comme la Suède.

Le chauffage passif créé par la serre est utilisée pour réchauffer l'ensemble de la maison en faisant circuler l'air chaud à travers les différentes pièces.

De plus l'inertie thermique de la maison est amplifiée par le choix des matériaux comme le béton ou la brique qui peuvent absorber la chaleur de la journée pour en restituer pendant la nuit.

Evidemment dans un pays comme la Suède la maison doit être extrême bien isolée. La maison profite de fenêtre à triple vitrage et des murs plus épais pour

limiter les pertes de chaleurs prenant le relais sur la serre qui réduit déjà ces pertes.

Pour assuré une qualité de l'air optimal la maison utilise une ventilation mécanique contrôlée (VMC), qui récupère la chaleur un peut sur le principes du puit canadien vu plus tôt pour garder une bonne qualité de l'air avec une perte énergétique minime. Les culture agricoles de la maison participe aussi à purifier l'air ambiant.

L'un des point majeur de la maison c'est aussi sont traitement de l'eau de pluie. Celle-ci est collectée et utilisée pour arroser les cultures de la serre diminuant encore plus l'impact environnement de la maison. Les eaux grises (eaux sale issue de la douche par exemple) sont nettoyer, traité et re-employé pur l'irrigation ou tout autre usage ne nécessitant pas d'eau potable.

Donc on peut voir à travers la mise en place de tous ces systèmes certains points positifs majeurs pour la maison moderne qui en ressortent.

Déjà l'efficacité énergétique bien supérieur un une construction traditionnelle. Comme le Naturhus possède un chauffage qui se repose sur l'énergie gratuite fournit par le soleil, la consommation énergétique est réduite drastiquement, d'autant plus que le chauffage est l'une des consommation énergétique les plus importantes dans un pays comme la Suède. L'efficacité de l'isolation perfectionner aux fils des ans dans le pays vient compléter cela minimisant au maximum les pertes liées au domaine thermique.

L'empreinte carbone quasi nulle de la maison grâce au recyclage de son eau et la source de nourriture qu'elle offre à ses habitants leur permettent de moins reposer sur les systèmes d'approvisionnement classique, donnant une

possibilité d'autosuffisance voir même de surproduction permettant un partage des ressources créées par l'habitat.

Enfin vivre dans une Naturhus, c'est bénéficier d'un cadre de vie exceptionnel qui se veut plus proche de la nature offrant un retour à une vie plus saine pour les occupants du lieu.

Si je devais en tirer une conclusion, c'est évidemment que la maison passive durable n'est pas une utopie mais bien une possibilité qui devrait être plus étudiée par les architectes d'aujourd'hui. La conception architecturale d'une maison sans l'intervention de technologies innovatrices peut offrir une solution suffisante au bien être de l'humain. Bengt Warne nous que dans le contexte actuel de transition énergétique dû au changement climatique, la Naturhus et autres maisons passive sont d'une pertinence inouïe.

Conclusion

Pour conclure, quand je regarde les conclusions tiré par les expérience comme le placelab du MIT ou de l'appartement Domus de Mathieu Gallissot, je comprend que ces nouvelles technologies ne peuvent être arrêter et qu'elle finiront inexorablement par être intégré avec ou sans l'aide de l'architecte. Pour autant il me semble évident que pour répondre à mon hypothèse de base, oui un logement intelligent n'a pas besoin d'électronique pour pouvoir clamer ce titre.

En revanche suite à la rédaction de ce mémoire je peux dire que ce serait une erreur de se limiter à l'architecte pour faire un logement intelligent.

Je pense que l'intégration de la technologies à nos logements est une bonne chose à conditions de respecter certain points que je nommerai dans une façon proche de Ken Sakamura lorsqu'il présente ce qu'était une maison intelligente, par la négation.

Il ne faut pas que le nombres de capteurs soit trop importants car leur remplacements aura un impact économique que les habitants ne seront pas forcements près à assumer.

Il ne faut que les capteurs soit visibles car ils influencent de manière inconsciente le comportement de certaines personnes, nuisant alors à leur confort.

Il ne faut pas intégrer chaque nouveauté technologique. Le Placelab l'a vu, certaine technologies ne survivent pas l'échelle du temps.

Et enfin il ne faut pas qu'elle remplace le travail de l'architecte. Ou que que l'architecte cède à la facilité non plus d'ailleurs en se reposant trop sur l'IA et ses capacités.

En respectant ces quelques mesures je pense qu'il est possible de créer un espace nouveau, plus adaptatif et conscient des gens qui l'utilisent. Un espace qui répondra à nos besoins de demain comme l'exemple du Naturhus qui est une réponse intégrant certaines solutions technologiques mineurs tout en laissant la majorité du travail de création de l'espace à l'architecte.

Il ne faut surtout pas oublier que l'espace doit faire rêver si il ne veut pas connaître le même sort que la domotique et de ses espaces froids et inattractifs qui l'ont conduits à son échec. Et d'une certaine manière on pourrait dire que, c'est un peu l'objectif de notre profession :

Faire rêver.

Bibliographie

- A Living Laboratory for the Design and Evaluation of Ubiquitous Computing Technologies. Stephen S. Intille, Kent Larson, J.S. Beaudin, J. Nawyn, E. Munguia Tapia, P. Kaushik. House_n, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139 USA, intille@mit.edu
- Cancellieri, A. (1992). *L'habitat du futur: défis et prospective pour le prochain quart de siècle* (p. 484). Paris, France: Documentation française.
ISBN:2-11-002868-8
- Damien Brulin, Eric Campo, Thierry Val, Adrien van den Bossche, Frédéric Vella, et al.. L'habitat intelligent : un lieu de conception des technologies pour l'autonomie des personnes. *Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle*, 2023, 4 (1), pp.21-51. 10.5802/roia.49 . hal-04126824
- Deval, J.-C. (1984). « Le confort thermique en climat tempéré ». *Revue de Physique Appliquée*, 19(7), 513-531.
doi:10.1051/rphysap:01984001907051300
- Fanger, P. O. (1967). « Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation ». *ASHRAE transactions*, 73(2).
- Fanger, P. O. (1973). « Assessment of thermal comfort practice ». *Occupational and Environmental Medicine*, 30(August 2009), 313-324. doi:10.1136/oem.30.4.313

- Fanger, P. O., Breum, N. O., & Jerking, E. (1977). « Can Colour and Noise Influence Man's Thermal Comfort? ». *Ergonomics*, 20(1), 11-18.
doi:10.1080/00140137708931596

- Givoni, B., & Icard, J. L. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. Éditions du Moniteur. ISBN:9782862820149

- Mathieu Gallissot. Modéliser le concept de confort dans un habitat intelligent : du multisensoriel au comportement. Mathématiques générales [math.GM]. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GREN018 . tel-00738342

- RF. (2000). « Arrêté du 29 Novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments ». *Journal Officiel de la République Française*, 277.

- RF. (2005). *Réglementation Thermique*. Note : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

- RF. (2012). *Réglementation Thermique*. Note : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

- RE2020. *Décret n° 2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine*

- Sabbah, C. (2010). « Dans ma maison branchée ». *Ambiances chez soi: L'air, le son, la lumière* (pp. 60-63). Editions Autrement.

- Sakamura, K. (1990). « The TRON Intelligent House ». *IEEE Micro*, 10, 6-7. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society. doi:10.1109/MM.1990.10017

- Talotte, C., Paradot, N., Da Costa, P., & Mzali, M. (2006). « Improvement of Climatic Comfort in Stations: Development of Numerical Simulations and Perception Analysis ». Congrès mondial de la recherche ferroviaire (WCRR). Montreal, Canada.

- A living laboratory for the design and evaluation of ubiquitous computing technologies – MIT Media Lab]

<https://www.media.mit.edu/publications/a-living-laboratory-for-the-design-and-evaluation-of-ubiquitous-computing-technologies-2/>

<https://ilp.mit.edu/node/37375>

- atlf.atlf.fr

- <http://www.carnot-lsi.com>

- <https://www.bordeaux.fr/l10812/miroir-d-eau>

- <https://www.aua-toulouse.org/adaptation-au-changement-climatique-les-5-leviers-pour-rafraichir-la-ville/>

- <http://multicom.imag.fr/multicom.imag.fr/spip5a8d.html?rubrique89>

- <https://www.ibm.com/topics/neural-networks>
- <https://www.google.com/url?sa=i&url=https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/IA-apprentissage-Rousseau.xml&psig=AOvVaw2iwhfWvQ4lxguyCBUhXutR&ust=1715886199875000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBIQjRxqFwoTCMjFqa2sklYDFQAAAAAdAAAAABAE>
- <https://www.redhat.com/fr/topics/internet-of-things/what-is-iot>
- https://www.researchgate.net/figure/Determination-de-la-valeur-du-PPD-en-pourcentage-en-fonction-de-lindice-PMV_fig9_340172640
- <https://www.hqe.guidenr.fr/cible-8-hqe/modele-analytique-confort-thermique.php>
- <https://www.oecd.org/fr/cad/39175139.pdf>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Badguir>
- <https://www.badgir.fr/badgirls>
- <https://projects.arch.chalmers.se/2021/02/05/naturhus/>
- <https://www.ibm.com/topics/neural-networks>
- <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/IA-apprentissage-Rousseau.xml>

- <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-2906-puits-canadien.html>
- <https://www.fiabitat.com/le-principe-du-puits-canadien/>
- <https://www.heliodome.com/un-concept/>