

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira-Bejaia
Faculté de Technologie
Département d'Architecture



Polycopié pédagogique

Cours : Évaluation du Confort dans le Bâtiment et Diagnostic Énergétique

Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine

Cours destiné aux étudiants de Master 2

Thématique : Architecture, Environnement et Technologies

Unité d'Enseignement Fondamentale 3

Année : 2020/2021

Table des matières

Avant-propos	v
Abréviations	vi

Introduction	1
--------------------	---

CHAPITRE I : Les méthodes d'évaluation du confort dans le bâtiment

Introduction	3
1. Le confort dans le bâtiment.....	3
1.1. L'aspect physique.....	4
1.2. L'aspect comportemental.....	5
1.3. L'aspect psychologique.....	6
2. Les méthodes d'évaluation du confort.....	6
2.1. La méthode analytique	6
2.2. La méthode empirique	7
2.3. La méthode expérimentale	8
2.3.1. La méthode expérimentale avec modèles réels	10
2.3.2. La méthode expérimentale avec modules ou cellules tests à une échelle réelle	10
2.3.3. La méthode expérimentale avec cellules à une échelle réduite	11
2.4. La méthode numérique.....	11
Conclusion.....	12

CHAPITRE II : Le confort thermique

Introduction	13
1. Le confort thermique	13
2. Les paramètres influant sur le confort thermique	14
2.1. Les paramètres liés à l'individu	14

2.1.1. Le métabolisme	14
2.1.2. L'habillement	15
2.2. Les paramètres liés à l'environnement	16
2.2.1. La température ambiante de l'air	16
2.2.2. La température des parois	16
2.2.3. L'humidité relative.....	17
2.2.4. La vitesse de l'air	17
3. Les échanges de la chaleur entre le corps et son environnement.....	18
4. L'équilibre thermique de l'occupant avec le bâtiment et l'environnement	19
5. La plage de confort température-humidité.....	20
6. L'interdisciplinarité du confort thermique	21
6.1. L'approche analytique.....	21
6.2. L'approche adaptative.....	23
Conclusion.....	23

CHAPITRE III : Le confort visuel

Introduction	25
1. Le confort visuel.....	25
2. Les paramètres du confort visuel	26
3. Les principales sources d'inconfort visuel	27
4. La stratégie de l'éclairage naturel	28
5. Le facteur de lumière de jour (FLJ)	29
6. La température de couleur.....	30
7. La propagation de la lumière.....	31
8. Les différents types de ciels	31
9. Les grandeurs photométriques	32
9.1. Le flux lumineux	33
9.2. L'intensité lumineuse	33
9.3. L'éclairement	34
9.4. La luminance.....	34
Conclusion.....	35

CHAPITRE IV : Le confort acoustique

Introduction	36
1. L'acoustique architecturale	36
2. Le confort acoustique	36
3. Les notions essentielles de l'acoustique	37
3.1. Le son	38
3.1.1. Le niveau sonore (en dB).....	38
3.1.2. La fréquence sonore (en Hz).....	39
3.2. La perception du bruit et la sensibilité de l'oreille	39
3.3. Le bruit	40
3.3.1. Sources et types de bruits.....	40
3.3.1.1. Les bruits aériens	41
3.3.1.2. Les bruits solidiens ou bruits d'impacts	41
3.3.1.3. Les bruits d'équipements	42
3.3.2. La propagation des bruits.....	42
3.3.3. Les chemins de transmissions	43
3.3.4. Les règles d'addition des niveaux du bruit	43
3.3.4.1. Si les bruits sont de niveaux voisins (écart < 10 dB).....	43
3.3.4.2. Si les bruits sont de niveaux très différents (écart > 10 dB).....	44
3.3.5. L'échelle des niveaux du bruit.....	44
3.4. Le temps de réverbération	45
4. La plage de confort acoustique	45
5. L'isolation et la correction acoustique	46
5.1. L'isolation acoustique	46
5.2. La correction acoustique	47
6. L'acoustique intégrée au projet	47
Conclusion	48

CHAPITRE V : La performance énergétique des bâtiments

Introduction	49
--------------------	----

1. La consommation énergétique mondiale	49
2. La consommation énergétique en Algérie.....	50
3. La performance énergétique des constructions	52
4. Les facteurs de performance énergétique.....	56
Conclusion.....	57

CHAPITRE VI : La modélisation et la simulation

Introduction	58
1. La modélisation	58
1.1. La modélisation en architecture	58
1.2. Les logiciels de modélisation.....	59
2. La simulation.....	59
2.1. Les logiciels de simulation.....	60
2.2. Les étapes de développement d'un modèle de simulation.....	62
2.3. Les échelles de la simulation en architecture.....	62
3. Le BIM	62
4. La simulation par ArchiWIZARD	64
4.1. Présentation du logiciel ArchiWIZARD.....	64
4.2. Méthodes de calcul.....	65
4.3. Les étapes de développement d'une simulation par ArchiWIZARD	66
Conclusion.....	66
Conclusion générale	68
Bibliographie.....	69

Avant-propos

Ce polycopié est un support pédagogique de la matière d'appui N°2 de l'Unité d'Enseignement Fondamentale "UEF 3" intitulée « Évaluation du Confort dans le Bâtiment et Diagnostic Énergétique ». Ce cours est réalisé conformément au programme officiel actuel établis par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique dans le cadre de l'harmonisation de l'offre de formation de Master en Architecture.

Ce document est destiné aux étudiants de Master 2 en Architecture de la thématique Architecture, Environnement et Technologies « AET ». Il est indispensable pour les étudiants en architecture et en particulier ceux orientés vers la dite thématique pour comprendre les notions de base de l'évaluation du confort dans le bâtiment afin de les appliquer dans leurs projets de fin d'études.

L'objectif de cette matière est de donner une initiation sur les méthodes d'évaluation et de diagnostic ainsi que sur les logiciels de modélisation et de simulation à travers l'acquisition des notions de base concernant les outils conceptuels, méthodologiques et logistiques nécessaires à l'établissement des diagnostics en rapport avec la thématique.

Pour bien comprendre et suivre cette matière, l'apprenant doit avoir acquis certaines connaissances de base liées à la physique du bâtiment, les matériaux de construction et la conception assistée par ordinateur (CAO). À l'issue de ce cours, l'apprenant sera capable de connaître les paramètres influant sur le confort de l'être humain, de modéliser et simuler le comportement thermique d'un bâtiment et estimer sa consommation énergétique. Le mode d'évaluation de la matière s'effectue par un examen (60 %) et un contrôle continu (40 %).

Afin d'aboutir aux objectifs soulignés et faciliter la compréhension de la matière, ce polycopié est structuré en sept chapitres avec des sujets précis et organisés du connu à l'inconnu et du simple au complexe.

Abréviations

Abréviation

ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Cf : Coefficient de forme.

PMV : Predicted Mean Vote (Vote Moyen Prévisible).

PPD : Predicted Percentage Dissatisfied (Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits).

Indices

CLO Unité d'isolement vestimentaire.

M Le métabolisme (w/m^2).

R La résistance thermique ($m^2.k/w$).

S La surface (m^2).

Ta La température ambiante de l'air ($^{\circ}C$).

Tp La température des parois ($^{\circ}C$).

Trs Température résultante sèche ($^{\circ}C$).

HR L'humidité relative de l'air (%).

U Le coefficient de transmission surfacique ($w/m^2.k$).

Vair La vitesse de l'air (m/s).

C Chaleur spécifique ($Kj/kg.k$).

D Densité (Kg/m^3).

Symboles

λ Conductivité thermique ($W/m.k$).

ρ Réflectance solaire (%).

Introduction



« L'architecture est une merveilleuse expression du processus de découverte. C'est comme un scientifique qui ne connaît pas la réponse, mais qui sait le chemin qui y mène. C'est cela qui me fait agir : la joie du chemin, la découverte »

Glenn Murcutt

Architecte, récipiendaire du prix Pritzker d'architecture en 2002

Introduction

La conception architecturale est une étape fondamentale dans la production du cadre bâti. Elle est également une étape très complexe vue ses aspects hyper-interférés. Cette phase influe considérablement sur plusieurs plans (thermiques, acoustiques, lumineux, énergétiques, environnementaux, etc.). A ce titre, elle nécessite l'étude et l'évaluation des choix et des alternatives afin de mieux répondre aux différentes exigences et résoudre les problèmes qui pourraient se poser ultérieurement.

Au fil du temps, la conception architecturale a connu de grands changements sous l'influence de plusieurs paramètres (l'essor technologique, l'évolution des modes de vie, l'émergence de nouvelles tendances, le développement de nouveaux matériaux et techniques de construction, etc.). Inévitablement, le projet architectural a subi l'influence parfois négative de ces bouleversements. Le mouvement moderne a contribué à la production d'une architecture parfaitement indifférente au climat en surestimant les possibilités technologiques et en les considérant aptes à remplacer l'enseignement et l'expérience des anciens (l'architecture vernaculaire). Avec ce mouvement, la notion même de l'architecture s'était profondément modifiée, elle n'est plus l'art de bâtir comme défini primitivement, elle était devenue un exercice plastique où les paramètres environnementaux et contextuels n'avaient plus leur place (style international, production rapide de bâtiments, architecture de fer et de verre, ...).

Souvent, l'utilisation excessive de l'énergie et le recours systématique aux équipements et installations techniques ont servi à cacher d'innombrables défauts conceptuels en rapport avec le confort des occupants. Plus grave encore, dans certain cas, l'emploi de systèmes sophistiqués et très chers s'est avéré peu efficace pour résoudre les problèmes liés au confort et à la qualité des ambiances. Cette situation est le résultat d'une pratique architecturale indifférente au contexte, où très souvent les paramètres thermiques, énergétiques et climatiques sont ignorés, surtout lors de la conception et le choix des éléments de l'enveloppe (matériaux, façade vitrée et dispositifs inappropriés au contexte climatique).

Jusqu'à la première crise pétrolière de 1973, la consommation énergétique n'était pas un problème. La confiance aveugle que les architectes ont voué à la société technologique a eu pour résultat la production d'une architecture « énergivore » à outrance, où le bien-être physiologique de l'utilisateur a été délégué à des installations techniques dépendant de sources épuisables, non renouvelables et polluantes. La crise pétrolière de 1973 fut considérée comme un déclic et un facteur de changement au niveau mondial. Il y eut une prise de conscience vis-à-vis des excès en matière de consommation énergétique et une réelle mobilisation afin de rationaliser cette consommation et protéger l'environnement. Une relation de cause à effet fut établie entre cette surexploitation énergétique et les changements climatiques (le réchauffement de la planète). La sonnette d'alarme fut tirée et de nouveaux concepts tels que la protection de l'environnement, le développement durable, les énergies renouvelables furent largement médiatisés.

Afin de corriger l'écart conceptuel existant entre les besoins des usagers, la conception des bâtiments et le contexte climatique tout en assurant des ambiances confortables avec la réduction des effets négatifs sur l'environnement, les études d'évaluation (diagnostic) et d'optimisation des bâtiments sont devenues une étape incontournable dans le processus de la conception architecturale. Ces opérations visent à optimiser le fonctionnement des constructions d'une manière passive en agissant sur les composants et les caractéristiques de la bâtisse (forme, organisation spatiale, enveloppe, matériaux, ...) ainsi que sa relation avec l'environnement immédiat (implantation, orientation, etc.) à travers l'utilisation des logiciels de simulation spécialisés.

CHAPITRE I :

Les méthodes d'évaluation du confort dans le bâtiment



« Man is the measure of all things » Protagoras

CHAPITRE I : Les méthodes d'évaluation du confort dans le bâtiment

« Il est plus simple d'évaluer le manque de confort que le confort »

W. Rybczynski

Introduction

L'évaluation du confort dans une construction et sa performance portent sur tous les composants notamment l'enveloppe, qui est considérée comme un élément crucial afin d'aboutir à une conception architecturale efficace. En effet, l'objectif primordial de la conception est de fournir aux occupants des ambiances intérieures confortables quelle que soit la nature des conditions extérieures tout en réduisant les impacts environnementaux indésirables. Cette évaluation est basée sur l'utilisation de différentes méthodes d'investigation (sur terrain, expérimentation, simulation, etc.).

1. Le confort dans le bâtiment

Le confort est défini comme :

« Un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement perçu »

(Liébard & De Herde, 2005)

La satisfaction vis-à-vis de l'environnement fait appel à toutes les dimensions physiques des ambiances, mais également à des aspects comportementaux et psychologiques. Ces trois dimensions, physiologiques, comportementales et psychologiques sont fortement liées comme le démontre la figure 1.1.

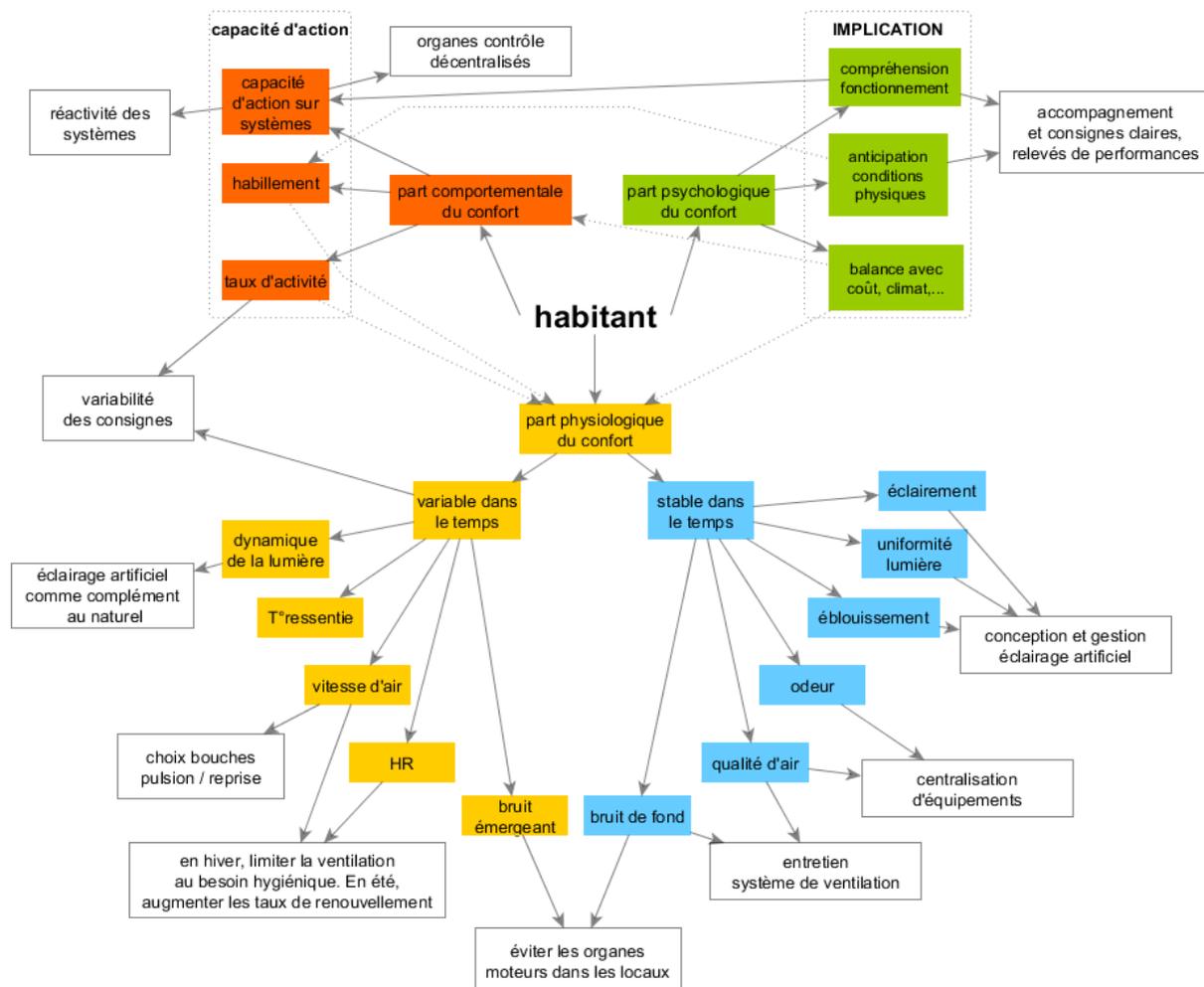


Figure 1.1 : Les dimensions du confort (Source : www.energieplus-lesite.be)

La combinaison des différentes dimensions du confort (physiologique, comportementale, psychologique) implique que le bien-être dans un bâtiment n'est pas une notion facile à décrire. Ce bien-être non seulement sera différent pour chacun, mais également variable dans le temps, selon son âge, son sexe, son état de santé, et même son humeur.

1.1. L'aspect physique

Au niveau physique ou physiologique, on distingue :

- **Le confort thermique** : afin d'assurer une température agréable été comme hiver tout en minimisant la consommation énergétique.
- **Le confort visuel** : pour profiter des apports de lumière naturelle et disposer d'un espace agréable à vivre.
- **Le confort acoustique** : pour réduire les nuisances sonores intérieures et extérieures.
- **Le olfactif et la qualité de l'air intérieur** : afin d'améliorer la qualité de l'air intérieur.

De nombreuses normes définissent des seuils minimums et/ou maximums pour les grandeurs physiques concernées (température, éclairage, puissance acoustique, vitesse de l'air, ...). La figure suivante illustre le diagramme psychrométrique.

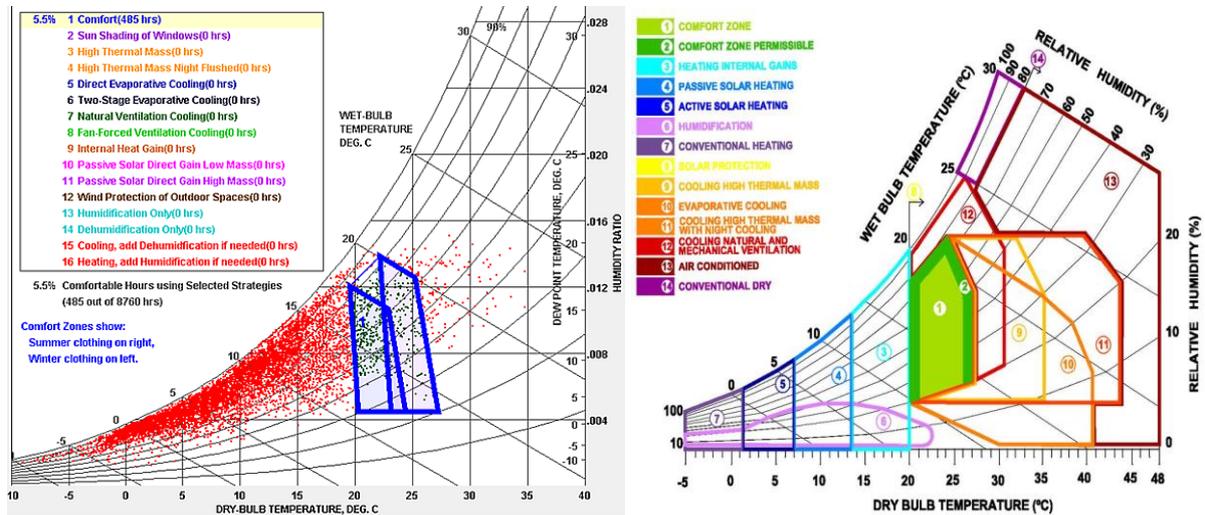


Figure 1.2 : Le diagramme psychrométrique (Source : www.flores-ammo.fr)

Le positionnement de ces plages peut permettre de déterminer la stratégie adéquate pour le bâtiment (privilégier la ventilation et/ou l'inertie thermique, etc.).

1.2. L'aspect comportemental

Au niveau comportemental, c'est la capacité d'action de l'occupant dans le bâtiment qui est mise en évidence car les conditions intérieures et les attentes sont variables dans le temps.

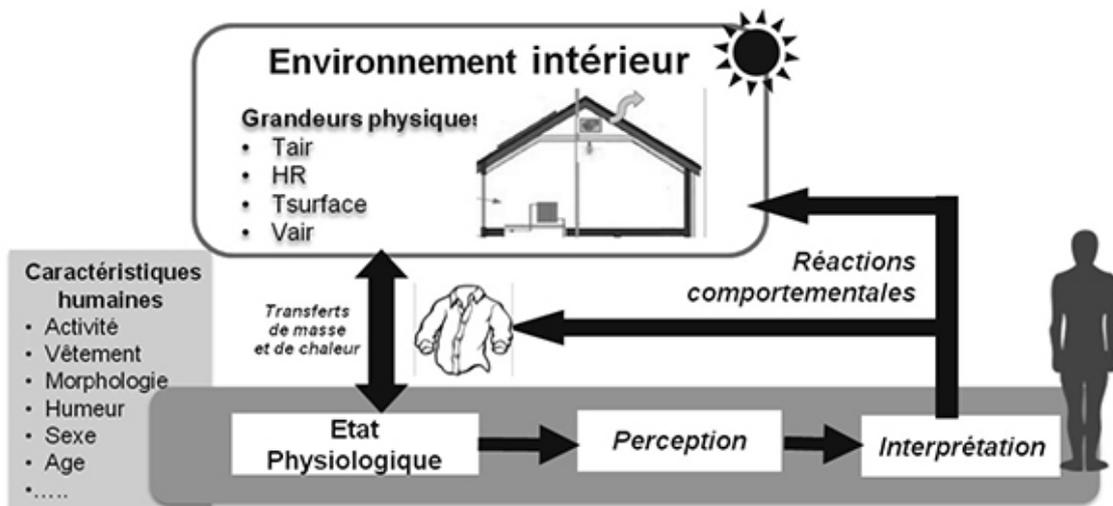


Figure 1.3 : L'aspect comportemental du confort (Source : www.books.openedition.org)

Il est donc important que l'occupant ait une capacité d'action sur les organes de contrôle des systèmes du bâtiment, sur son activité et sur son habillement.

1.3. L'aspect psychologique

Au niveau psychologique, c'est surtout l'implication de l'occupant qui est mise en avant lorsque l'on parle d'énergie. Il ne suffit pas qu'il ait la capacité de contrôler son environnement si ces besoins physiologiques le demandent, il faut qu'il ait conscience de cette capacité.

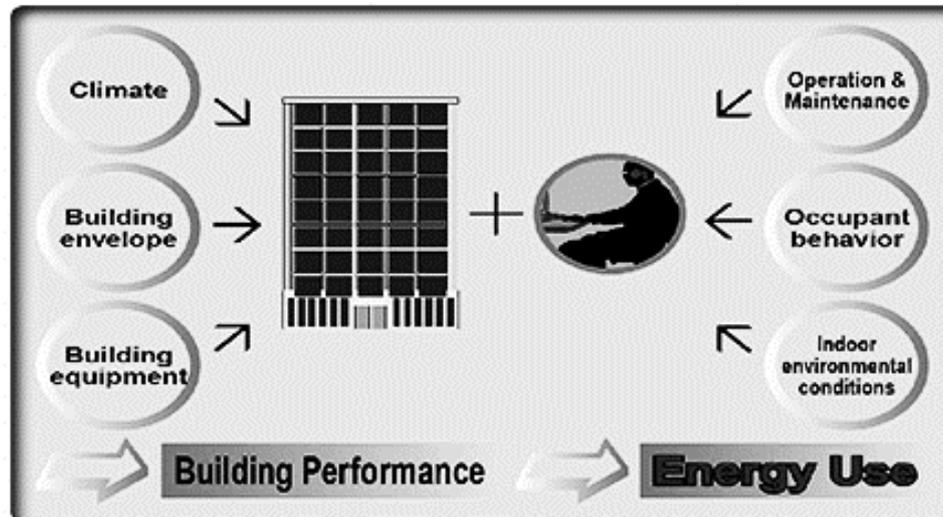


Figure 1.4 : L'aspect psychologique du confort (Source : www.books.openedition.org)

L'implication fait donc intervenir la compréhension du fonctionnement du bâtiment, la capacité d'anticiper les conséquences de ses actions sur l'ambiance et une compréhension du lien entre ses actions et leur impact énergétique.

2. Les méthodes d'évaluation du confort

Il y a plusieurs méthodes d'évaluation du confort dans le bâtiment :

- La méthode analytique (classique) sous forme de calcul mathématique ;
- La méthode empirique (in situ) ;
- La méthode expérimentale (soit par modèles réels ou réduits) ;
- La méthode numérique (simulation).

2.1. La méthode analytique

La méthode analytique (classique) est une méthode basée principalement sur des calculs relatifs aux composants du bâtiment, elle utilise des formules et des caractéristiques thermiques des matériaux telle que la conductivité thermique " λ " pour calculer les aspects thermiques des murs notamment, la résistance thermique " R " et la transmission thermique " U " comme le démontre la figure 1.5.

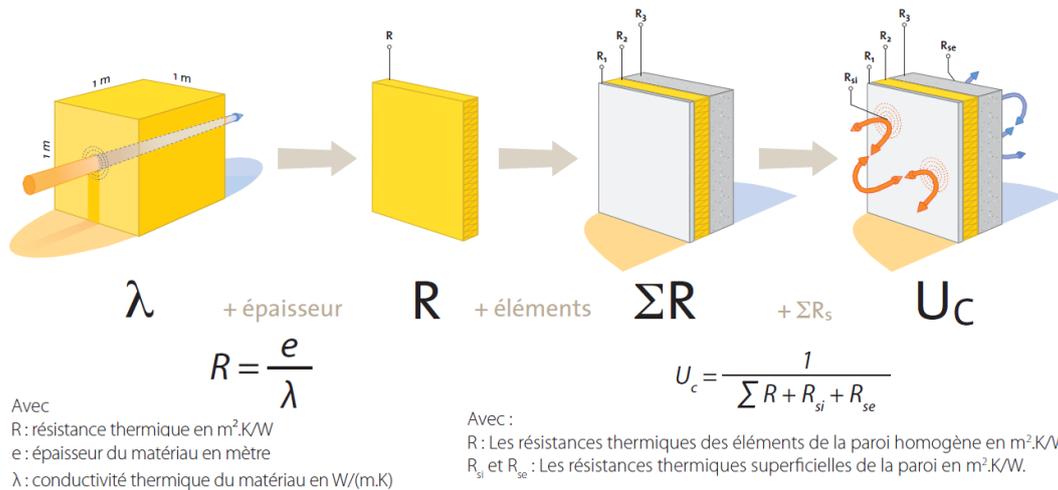


Figure 1.5 : Exemple de calculs employés dans la méthode analytique

(Source : www.saint-gobain.com)

La méthode analytique permet de décrire le fonctionnement thermique de la construction à travers l'utilisation des principes de la physique du bâtiment. Cette méthode est considérée comme un outil classique mais elle constitue la base des méthodes numériques développées (la simulation).

2.2. La méthode empirique

L'étude sur terrain (empirique) est effectuée à travers des prises de mesures in situ (sur des bâtiments existants), parfois ces mesures sont accompagnées d'enquêtes (questionnaires).

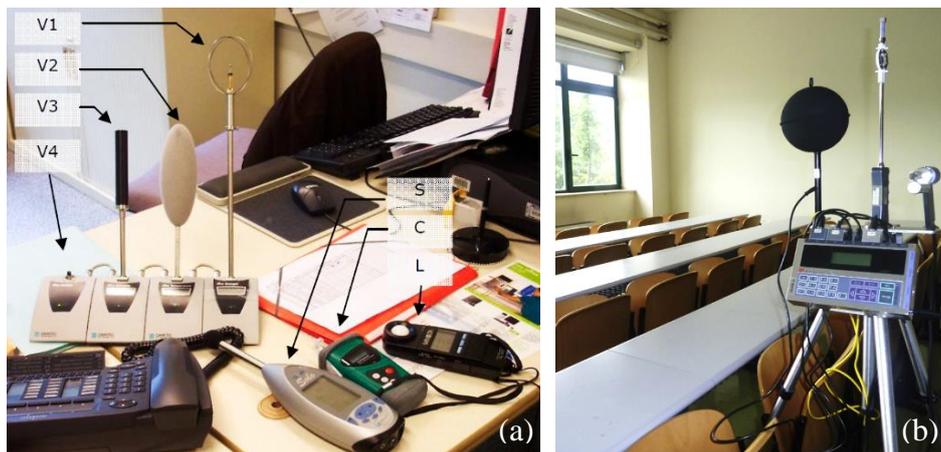


Figure 1.6 : Exemple des études in situ sur des cas réels

(Source : (a) Moujalled, 2007 ; (b) Buratti et al., 2013)

Cette méthode est largement utilisée vue la fiabilité des résultats obtenus par cette technique qui étudie les phénomènes réels sous l'interaction de tous les facteurs. Son inconvénient réside, toutefois, dans la difficulté d'isoler les paramètres pour établir des causalités.

La figure suivante illustre les instruments de la prise de mesures sur terrain.



Figure 1.7 : Les instruments de la prise de mesures (Source : www.testo.com)

L'anémomètre multifonction pour mesurer la température ambiante (T_a), l'humidité, la vitesse de l'air (V_a), etc. La caméra thermique pour mesurer la température surfacique et détecter les ponts thermique. Le thermomètre infrarouge pour mesurer la température surfacique des parois (T_{se} et T_{si}). Le thermomètre à sonde pour mesurer la température ambiante (T_a) et l'humidité. Le luxmètre pour mesurer l'éclairement et le sonomètre afin de mesurer le bruit.

2.3. La méthode expérimentale

La méthode expérimentale est parmi les techniques de recherches les plus utilisées au niveau mondial et dans tous les domaines. Elle permet de tester différents éléments ou phénomènes (variables) dans des conditions naturelles (réelles) ou contrôlées (en laboratoire).

Dans le domaine du bâtiment, les recherches expérimentales peuvent être des études effectuées sur des modèles ou cellules tests exposées directement à des conditions climatiques extérieures (conditions réelles) ou à des conditions contrôlées (en laboratoire). Ce type d'études expérimentales peut porter sur l'exploitation de modules ou cellules tests à une échelle réelle ou réduite. En outre, l'expérimentation peut s'intéresser à une composante du bâtiment mais dans des conditions contrôlées au niveau d'un laboratoire (une garde thermique ou une chambre climatique). La figure 1.8 illustre une étude expérimentale en laboratoire à travers l'utilisation d'un modèle à échelle réelle dans une cellule garde.

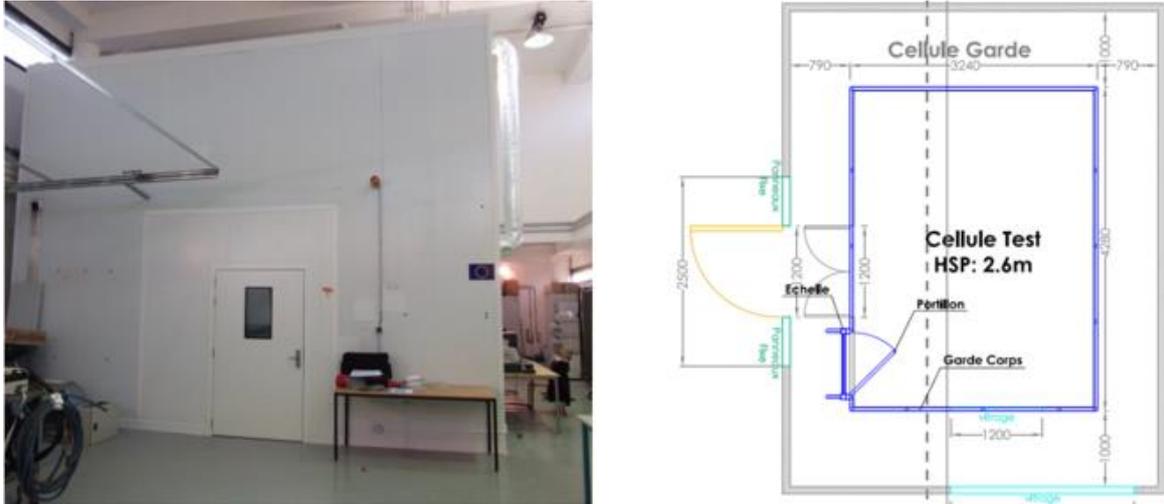


Figure 1.8 : Vue et plan d'une cellule garde avec une cellule test (Source : Cablé, 2013)

La cellule garde (la garde thermique) est utilisée pour fournir des conditions thermiques contrôlées similaires ou supérieures aux conditions réelles, ce qui facilite l'étude des différents phénomènes au niveau de la cellule test (le comportement thermique, le flux de la chaleur, la performance des matériaux et des isolants, la consommation énergétique, etc.) dans des conditions extrêmes avec un temps de test succinct.

Par ailleurs, il existe des appareils pour les études expérimentales. La figure suivante présente un appareil de mesure du facteur solaire « g » des éléments translucides de l'enveloppe au niveau du laboratoire du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment CSTB à Grenoble.



Figure 1.9 : Appareil de mesure du facteur solaire des éléments translucides de l'enveloppe du bâtiment (Source : Auteur, 2017)

Cet appareil a la capacité de quantifier les apports solaires transmis à travers les éléments translucides de l'enveloppe des bâtiments.

2.3.1. La méthode expérimentale avec modèles réels

La méthode expérimentale avec modèles réels porte sur la réalisation de prototypes afin d'étudier plusieurs paramètres ou phénomènes. En effet, cette méthode a des avantages mais reste très coûteuse. La figure suivante présente une vue de la plateforme d'essais de l'Institut National de l'Energie Solaire « INES » en France (a) et une maison bioclimatique au niveau du centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment « CNERIB » – Algérie (b).

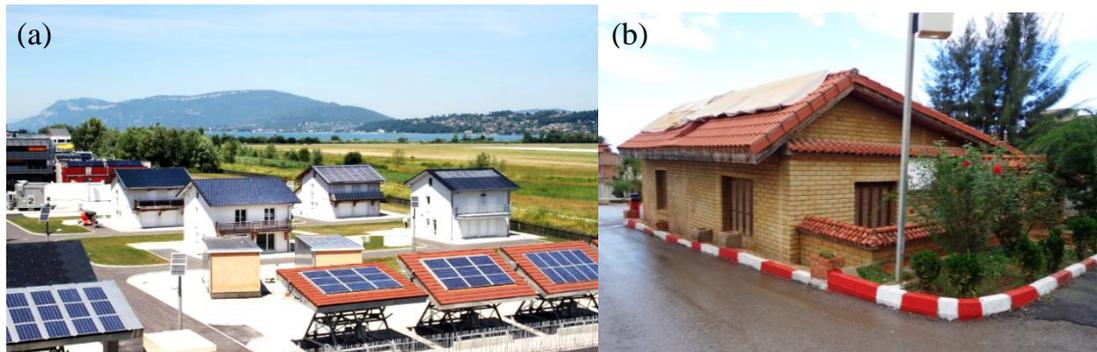


Figure 1.10 : Exemples de la méthode expérimentale avec modèles réels

(Source : (a) Ibrahim, 2014 ; (b) Auteur, 2017)

En effet, cette méthode a des avantages mais reste très coûteuse. Pour cette raison, les études expérimentales ont été orientées vers d'autres méthodes telle que l'exploitation des cellules tests réelles et réduites.

2.3.2. La méthode expérimentale avec modules ou cellules tests à une échelle réelle

Dans cette méthode, les chercheurs exploitent des cellules tests à une échelle réelle afin d'étudier plusieurs phénomènes. La figure 1.11 illustre un exemple d'une étude expérimentale par des cellules tests à une échelle réelle.



Figure 1.11 : Exemple d'une étude expérimentale par des cellules tests à une échelle réelle

(Source : Fernández-González, 2007)

Cette méthode représente également des atouts mais toujours le coût élevé demeure un problème crucial.

2.3.3. La méthode expérimentale avec cellules à une échelle réduite

L'utilisation des cellules tests à une échelle réduite est la méthode la plus utilisée par les chercheurs vu ses avantages et la fiabilité de ses résultats. La figure 1.12 illustre une étude expérimentale effectuée par des cellules tests à une échelle réduite.

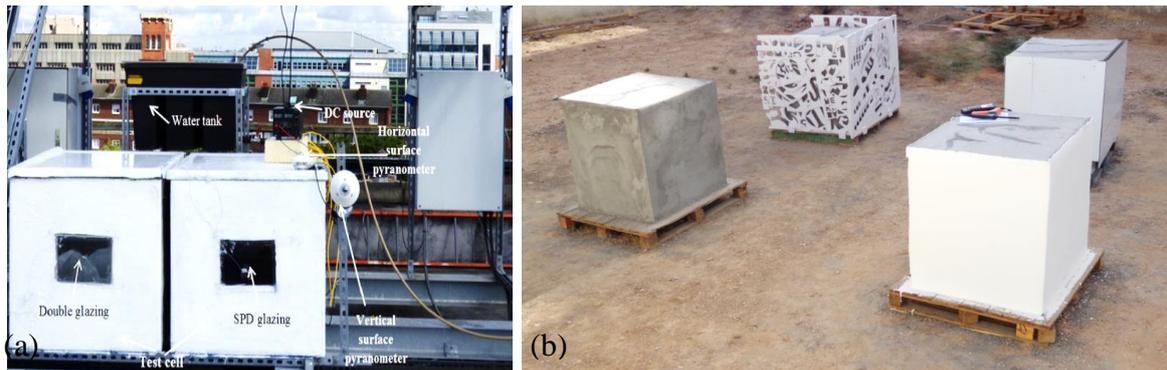


Figure 1.12 : Exemple des études expérimentales par des cellules tests à une échelle réduite

(Source : (a) Ghosh et al., 2016 ; (b) Auteur, 2019)

Les échelles utilisées par les chercheurs allant jusqu'à (1/10) et les échelles les plus fréquentes sont (1/20) et (1/50).

2.4. La méthode numérique

La méthode numérique à travers l'exploitation de différents logiciels de simulation c'est une technique largement répandue dans le milieu de la recherche. L'utilisation de cette méthode a connu un grand développement vu les atouts qu'ils offrent dans l'évaluation des bâtiments dans des conditions différentes. La figure 1.13 présente un exemple de simulation de l'influence de l'ombrage de moucharabieh sur l'exposition aux radiations solaires.

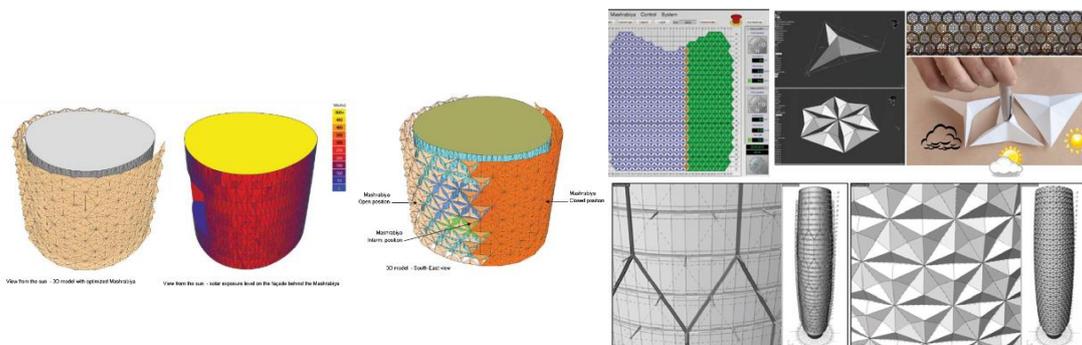


Figure 1.13 : Simulation de l'impact de l'ombre de moucharabieh sur l'exposition aux radiations solaires (Source : Karanouh et al., 2015)

À noter que la simulation numérique constitue la méthode la plus exploitée dans le domaine de l'architecture.

Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients. La méthode analytique est une méthode classique mais relativement consommatrice de temps. Le travail sur terrain est pour sa part caractérisé par de grandes difficultés et obstacles de faisabilité (administratifs, l'assurance des conditions naturelles, le temps, etc.) mais il donne une bonne compréhension du phénomène étudié particulièrement les paramètres liés aux personnes (sensation et satisfaction des occupants). L'étude expérimentale par des modèles réels et cellules à échelle réelle est une approche porteuse de beaucoup d'avantages mais elle reste très coûteuse ce qui oblige les chercheurs à se tourner vers des cellules tests à une échelle réduite. Cette technique est actuellement la plus appropriée pour étudier les phénomènes physiques dans des conditions réelles, en outre, elle donne une bonne compréhension des paramètres étudiés. Concernant l'étude numérique sur des modèles virtuels, elle présente plusieurs avantages sur plusieurs plans mais elle nécessite une bonne maîtrise de l'outil de la simulation et la validation des résultats. Plus précisément, pour mieux comprendre les paramètres étudiés et donner plus de fiabilité aux recherches, il est nécessaire de combiner entre plusieurs méthodes afin de vérifier et valider les résultats obtenus.

Conclusion

Le confort est une notion très importante dans le domaine du bâtiment, il est caractérisé par la subjectivité et la complexité car son influence sur les différentes dimensions physiologique, comportementale et psychologique de l'individu. Les études d'évaluation du confort dans les constructions et de la performance de ces derniers sont basées sur des méthodes analytiques, empiriques sur terrain, expérimentales (par des cellules tests à une échelle réelle ou réduite) et numériques selon l'élément étudié et les objectifs de l'étude. Néanmoins, la variété des contextes et les conditions climatiques nécessitent d'effectuer des études approfondies pour chaque région afin de trouver des solutions adéquates et bien adaptées qui assurent le confort des usagers et la performance du bâtiment sur tous les plans.

CHAPITRE II : Le confort thermique



Qu'est-ce que le confort thermique ?

CHAPITRE II : Le confort thermique

Introduction

Le confort thermique est une thématique très importante vu ses impacts sur la qualité de l'espace produit et la satisfaction des usagers vis-à-vis de ce dernier. Le confort thermique est une sensation de bien-être physique générée par la combinaison de plusieurs paramètres et facteurs liés au bâtiment, au climat et aux utilisateurs. Cette notion constitue, aujourd'hui un grand champ de recherches car son importance et son caractère multidisciplinaire ont engendré l'apparition de plusieurs approches d'investigation et d'évaluation.

La nature de l'ambiance thermique ressentie à l'intérieur de l'espace influe sur le comportement de l'occupant et ses gestes de régulation. Implicitement, l'ambiance inconfortable pousse les usagers à recourir à des moyens mécaniques de régulation thermique sous forme d'équipements de chauffage et de climatisation. Ceci engendre une augmentation de la consommation énergétique au dépend d'une exploitation irrationnelle des ressources non renouvelables et de la dégradation irréversible de l'environnement.

1. Le confort thermique

Le confort thermique est une notion très complexe vu le grand nombre de facteurs l'influençant et son caractère subjectif. En effet, il est difficile de donner une définition précise du confort thermique, mais d'une manière générale, il signifie l'existence d'un état de satisfaction de l'occupant dans une ambiance thermique.

«Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement » (Liébard & De Herde, 2005)

2. Les paramètres influant sur le confort thermique

Le confort thermique de l'être humain dépend de six paramètres liés à l'individu et à l'environnement tels que le métabolisme, l'habillement, la température ambiante de l'air, la température des parois, l'humidité relative et la vitesse de l'air.



Figure 2.1 : Les paramètres influant sur le confort thermique
(Source : www.pae-engineers.com - adaptée par l'auteur, 2018)

2.1. Les paramètres liés à l'individu

Il y a deux paramètres (le métabolisme et l'habillement).

2.1.1. Le métabolisme

Le métabolisme (M) du corps humain est l'opération de la production de la chaleur afin de maintenir la température du corps autour de $36,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ce paramètre varie en fonction de l'activité qui influe directement sur la température du confort.

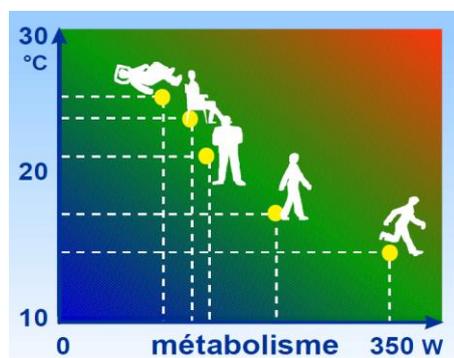


Figure 2.2 : L'impact de l'activité et du métabolisme sur la température du confort
(Source : Liébard & De Herde, 2005)

Le tableau 2.1 illustre l'impact de différentes activités sur les valeurs du métabolisme (M en met et en W/m²).

Tableau 2.1 : L'impact de l'activité sur les valeurs du métabolisme

(Source : Jedidi & Benjeddou, 2016)

L'activité	met	W/m ²
Repos, couché	0,8	45
Repos, assis	1,0	58
Activité légère, assis (bureau, école)	1,2	70
Activité légère, debout (laboratoire, industrie légère)	1,6	95
Activité moyenne, debout (travail sur machine)	2,0	115
Activité soutenue (travail lourd sur machine)	3,0	175

Le métabolisme (M) exprimé en "met" ou en "W/m²" où 1 met = 58,15 W/m². Les valeurs du métabolisme augmentent avec le renforcement du rythme d'activité ce qui engendre la production de la chaleur et l'augmentation des échanges thermiques entre le corps et l'environnement.

2.1.2. L'habillement

L'habillement ou l'isolement vestimentaire, est considéré comme un élément de résistance thermique contre les échanges de la chaleur entre la surface de la peau et l'ambiance thermique, il est mesuré en "Clo" où 1 Clo = 0,155 °C.m²/ W.

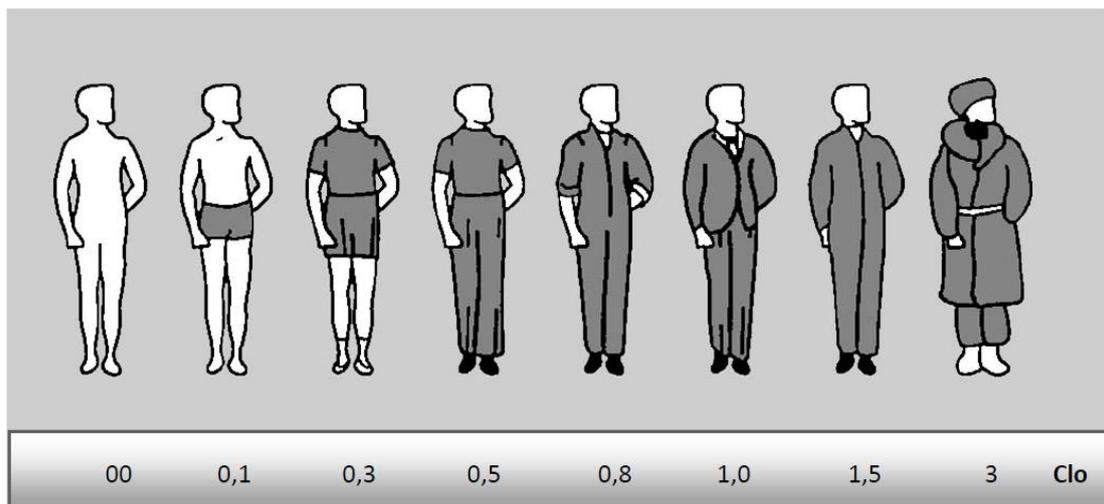


Figure 2.3 : Valeurs de l'isolement vestimentaire de différents vêtements

(Source : Mazari, 2012)

Chaque élément de l'habillement influe directement sur la valeur de l'isolement vestimentaire qui influe pour sa part sur les échanges thermiques entre le corps et l'environnement.

2.2. Les paramètres liés à l'environnement

Il y a quatre paramètres (la température ambiante de l'air, la température des parois, l'humidité relative et la vitesse de l'air).

2.2.1. La température ambiante de l'air

La température ambiante de l'air (T_a) est un paramètre très important qui influe sur la température du confort. Cette dernière appelée aussi la température opérative ou la température résultante sèche, elle est calculée par la moyenne de la température ambiante (T_a) et la température des parois (T_p) comme le démontre la formule suivante :

$$T_{rs} = \frac{T_a + T_p}{2}$$

2.2.2. La température des parois

La température des parois (T_p) représente la température moyenne de toutes les parois internes. Ce paramètre influe sur la température opérative ainsi que sur le confort tactile par l'effet de la paroi froide ou la paroi chaude.

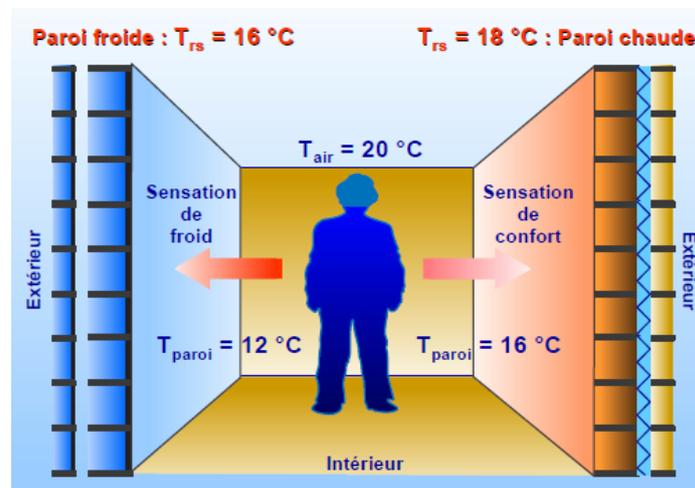


Figure 2.4 : L'influence de la température de l'air et des parois sur la température de confort

(Source : Liébard & De Herde, 2005)

La prise en compte de la température de l'air et la température des parois permet d'assurer des ambiances confortables.

2.2.3. L'humidité relative

L'humidité relative (HR) représente le rapport entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température (T_a) et la quantité maximale d'eau contenue à la même température. La figure suivante illustre la plage de taux d'humidité ambiante exprimée en pourcentage (%) et ses différents impacts.

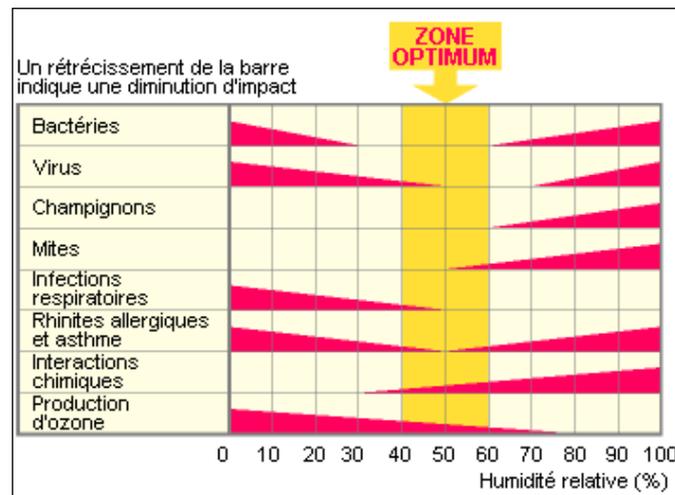


Figure 2.5 : La plage de taux d'humidité ambiante et ses différents impacts

(Source : www.energieplus.be, d'après Scofield et Sterling, 2017)

La plage de taux d'humidité ambiante optimale d'un point de vue hygiénique se situe entre 40 et 60 %. Les problèmes liés à l'humidité commencent hors de la plage d'humidité (de 40 à 60 %) avec deux manières :

- Un taux d'humidité inférieur à 30 % :
Un milieu sec avec des problèmes respiratoires et l'augmentation de la concentration de la poussière dans l'air, etc. ;
- Un taux d'humidité supérieur à 70 % :
Une ambiance très humide qui engendre des problèmes de la condensation, la croissance des microbes et des virus ainsi que l'apparition des champignons.

2.2.4. La vitesse de l'air

La vitesse de l'air (V_{air}) est un paramètre qui influe sur les échanges de la chaleur par convection et augmente l'évaporation de la surface de la peau, elle est mesurée en (m/s). La figure 2.6 présente la variation de la température du confort selon la vitesse de l'air avec un habillement moyen.

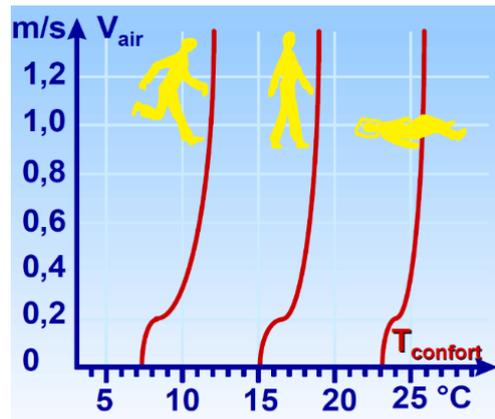


Figure 2.6 : La variation de la température de confort en fonction de la vitesse de l'air
(Source : Liébard & De Herde, 2005)

Après la vitesse de 0,2 m/s, l'air pousse l'individu à ressentir son mouvement et constitue une source de gêne.

3. Les échanges de la chaleur entre le corps et son environnement

Dans toutes ambiances thermiques, un ensemble d'échanges de la chaleur se font entre le corps de l'occupant et l'environnement thermique. Cette interaction engendre des échanges cutanés et respiratoires. La figure ci-après résume les échanges de la chaleur effectués entre le corps et l'ambiance.

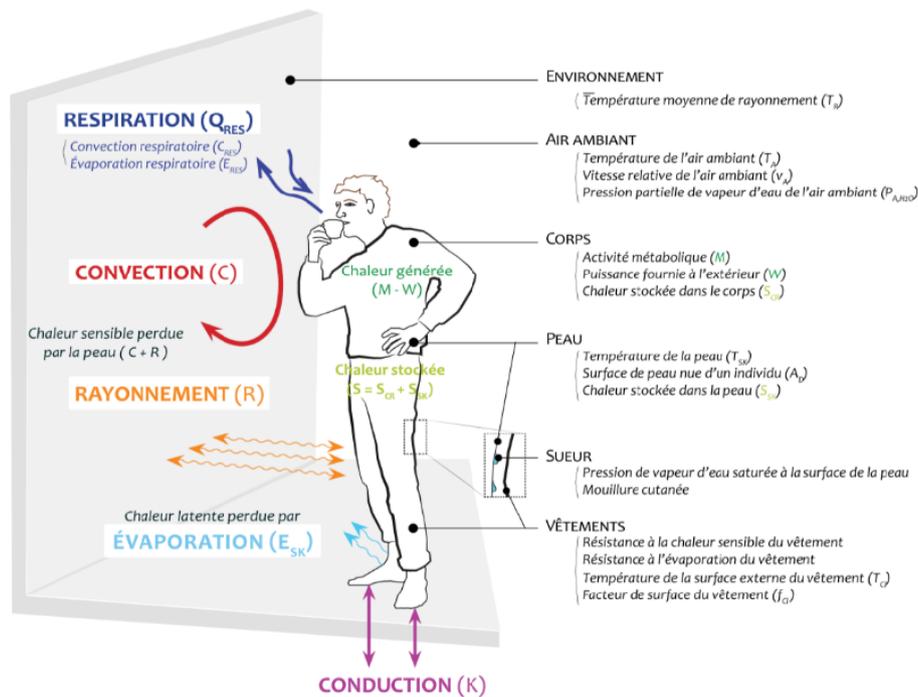


Figure 2.7 : Les échanges thermiques entre le corps et son environnement
(Source : Batier, 2016)

Les échanges respiratoires (Q_{RES}) s'effectuent par convection (C_{RES}) et par évaporation (E_{RES}) comme il est illustré par l'équation suivante :

$$Q_{RES} = C_{RES} + E_{RES}$$

Où :

- Q_{RES} : Le flux de chaleur échangé par respiration (W/m^2) ;
- C_{RES} : Les échanges thermiques par convection respiratoire (W/m^2) ;
- E_{RES} : Les échanges thermiques par évaporation respiratoire (W/m^2).

Les pertes respiratoires sont relativement faibles par rapport aux pertes cutanées.

4. L'équilibre thermique de l'occupant avec le bâtiment et l'environnement

La bonne conception d'un bâtiment signifie l'existence de bonnes relations harmonieuses entre l'utilisateur, tous les composants du bâtiment et l'environnement. La prise en compte du contexte climatique pendant la conception influe directement sur le fonctionnement de la construction au niveau de plusieurs plans entre autres ceux de nature thermique. Ce dernier pour sa part, influe sur le comportement thermique des occupants, leurs gestes et leurs satisfactions. La figure 2.8 illustre l'évolution des températures dans deux bâtiments (un mal adapté et l'autre bien adapté) dans des conditions naturelles (sans chauffage ou climatisation) durant toute l'année.

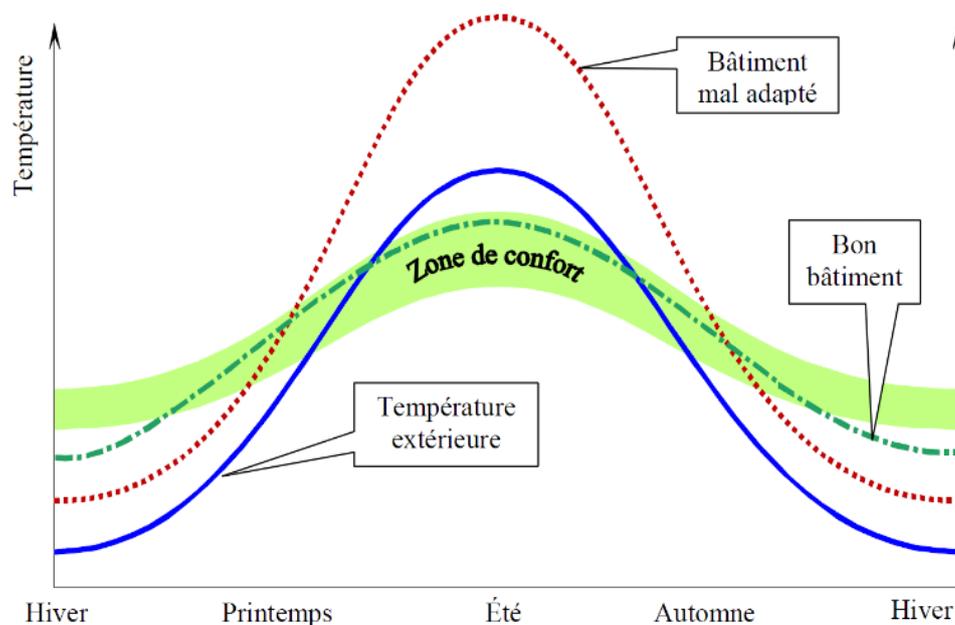


Figure 2.8 : L'évolution des températures dans deux bâtiments au cours de l'année sans chauffage et sans climatisation (Source : Roulet, 2004)

Un bâtiment mal adapté engendre une hausse considérable de la température pendant la période chaude avec des températures très basses durant la période froide. Par contre, le bâtiment bien adapté assure des températures confortables autour de la zone de confort thermique durant toute l'année, il est confortable naturellement. Par ailleurs, l'autre bâtiment nécessite des installations immenses afin d'assurer des ambiances thermiques acceptables.

En effet, un bâtiment mal adapté avec un choix inapproprié des éléments de l'enveloppe engendre des situations thermiques inconfortables durant toute l'année sous l'influence des besoins paradoxaux des fonctions de l'enveloppe et ses impacts sur l'ambiance thermique à travers des gains et des pertes selon la saison. L'intégration du bâtiment dans son environnement a une grande influence sur les utilisateurs et la construction. L'interaction du bâtiment et l'environnement avec les occupants de l'espace influe sur leur sensation thermique et ses mécanismes d'ajustement et d'adaptation ce qui influe sur ses gestes (l'ouverture des fenêtres ou l'exploitation des équipements, etc.).

5. La plage de confort température-humidité

Le confort température-humidité est appelé un confort hygrothermique. La plage de confort hygrothermique est déterminée par le diagramme suivant.

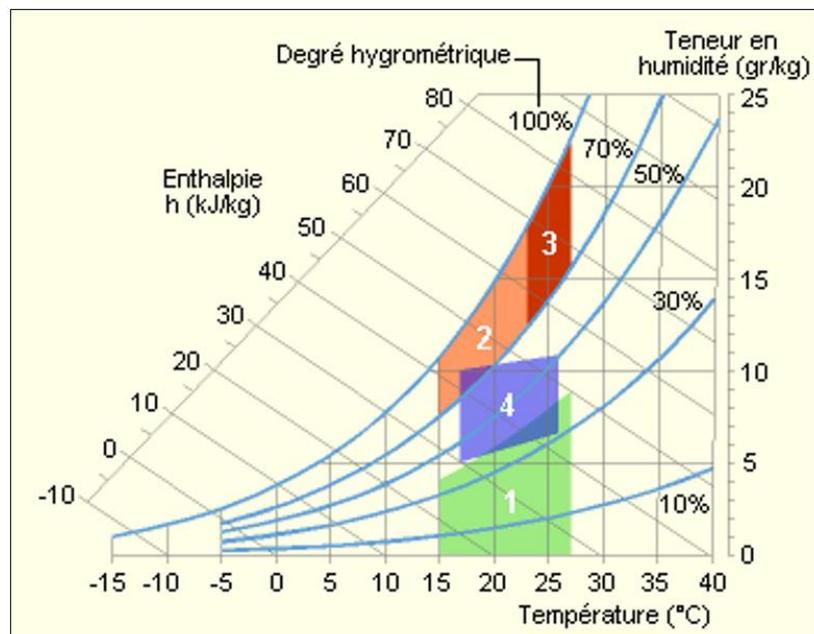


Figure 2.9 : La plage de confort hygrothermique (Source : www.energieplus.be)

Grace à ce diagramme, la détermination de la plage de confort hygrothermique est possible par la lecture des valeurs des températures et de l'humidité relative.

Les quatre zones suivantes sont déterminées dans ce diagramme :

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

6. L'interdisciplinarité du confort thermique

Le confort thermique est une notion très vaste car elle englobe plusieurs domaines et elle touche plusieurs aspects. Il est très complexe et dépend de nombreux facteurs qui ont une incidence sur la sensation et la satisfaction des personnes. L'individu est considéré comme une machine thermique dans l'approche physique. L'approche physiologique étudie les mécanismes d'autorégulation et l'approche psychologique focalisant sur le côté psychologique. L'interaction entre toutes ces approches et mécanismes donne la réponse de la personne vis-à-vis de l'ambiance thermique.

La caractéristique essentielle de cette notion est sa pluridisciplinarité qui réunit plusieurs domaines comme l'énergie, l'informatique et la matière ainsi que la physique, la psychologie, l'architecture et la biologie. En effet, le confort thermique a constitué un grand champ de recherche dans le domaine de l'architecture, car l'objectif principal de la conception architecturale est de fournir des ambiances confortables aux usagers de l'espace. Pour cette raison, il est nécessaire pour l'architecte de cerner les paramètres du confort et les mécanismes du corps humain et les prendre en compte lors de la conception afin d'assurer le bien-être des occupants.

Dans la littérature du confort thermique, il existe deux approches, l'approche analytique (ou statique) et l'approche adaptative

6.1. L'approche analytique

Les normes et les méthodes d'évaluation primaire du confort thermique sont axées essentiellement sur des conditions stables dans des laboratoires et basées particulièrement sur le transfert thermique entre le corps, l'environnement et le côté physiologique. Les méthodes les plus connues sont l'indice de confort thermique PMV de Fanger et le modèle de Gagge à deux nœuds. L'approche analytique ou statique est basée principalement sur le côté physique et physiologique à travers le calcul du bilan thermique du corps humain et ses échanges avec

l'ambiance thermique, ce qui donne la possibilité de la prédiction du niveau du confort grâce à l'exploitation des indices déterminés expérimentalement dans des chambres climatiques.

Grâce à des recherches sur un grand nombre de personnes (environ 1300 personnes) au niveau des chambres climatiques, Fanger a édité un livre en 1970 sous le titre « Thermal Comfort », qui est considéré comme une référence très importante dans le domaine du confort thermique. L'approche développée par Fanger (1967) avec les indices de PMV « Predicted Mean Vote ou Vote Moyen Prévisible » et PPD « Predicted Percentage Dissatisfied ou Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits » sont les plus exploités pour décrire le confort thermique de l'être humain. Dans cette approche, Fanger considère que le niveau du confort thermique varie en fonction de trois éléments, l'équilibre du bilan thermique, la température moyenne de la peau et la sudation située dans les limites du confort. L'indice de « PMV » donne le vote moyen des individus interrogés qui indique des avis sur leurs sensations thermiques moyennes selon l'échelle de l'ASHRAE « American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers » qui varie de (-3) à (+3) où chaque numéro exprime une sensation thermique. L'insuffisance de l'indice du PMV à exprimer le confort et la satisfaction des personnes ainsi que l'existence des situations où les individus sont insatisfaits ont donné à Fanger à développer l'indice du PPD « Predicted Percentage Dissatisfied » qui complète le premier indice PMV et permet de déterminer le pourcentage des personnes insatisfaites vis-à-vis de l'ambiance thermique. La figure suivante illustre la répartition de l'indice du PPD en fonction du PMV.

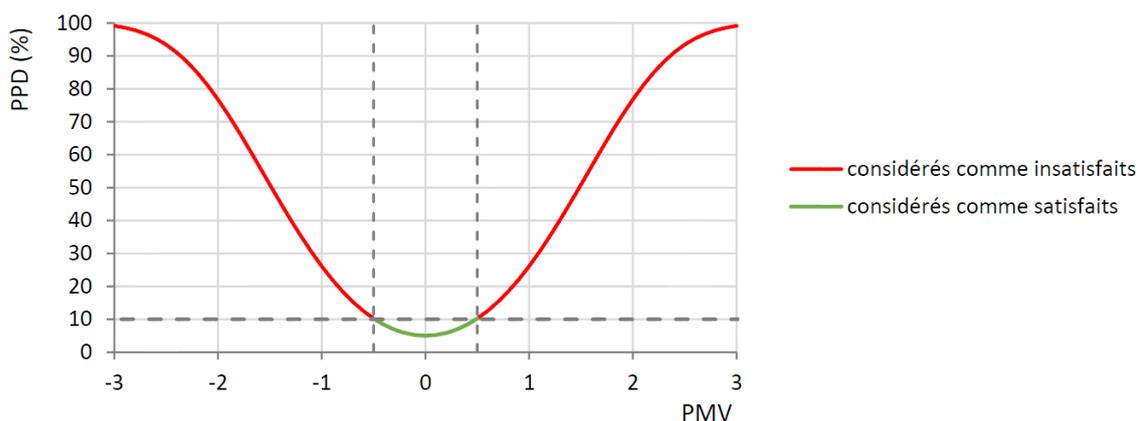


Figure 2.10 : La répartition du PPD en fonction du PMV (Source : Batier, 2016)

Malgré que l'indice du PMV soit égal à (0), il exprime une sensation idéale du confort thermique, il y a toujours un pourcentage de 5 % des personnes insatisfaites par rapport à l'environnement thermique comme le démontre l'axe du PPD.

6.2. L'approche adaptative

L'approche adaptative traite le confort thermique selon les réactions comportementales et la propriété adaptative du corps humain dans l'ambiance thermique. Le concept du confort thermique adaptatif représente la capacité des occupants à l'adaptation dans leur environnement thermique. Contrairement à l'approche analytique qui est basée sur des études en chambres climatiques traitant l'aspect physique et physiologique, l'approche adaptative est basée sur des études et des enquêtes sur terrain qui prennent en considération les aspects physiques, physiologiques et psychologiques en fonction des données climatiques extérieures. La figure suivante présente un diagramme du confort thermique adaptatif selon la norme ASHRAE 55-2017.

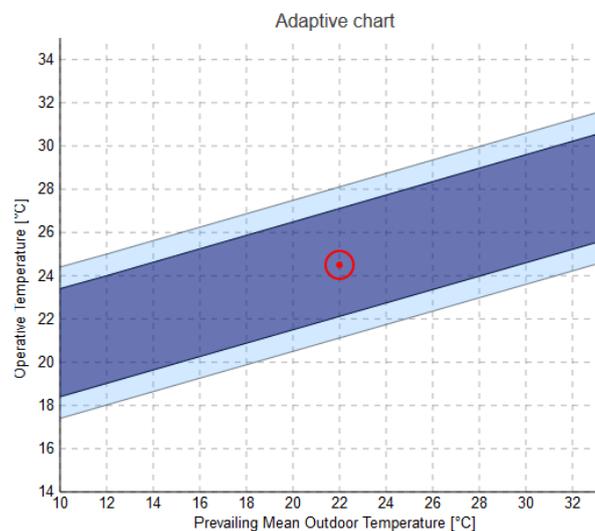


Figure 2.11 : Diagramme du confort thermique adaptatif selon la norme ASHRAE

(Source : www.flores-amo.fr)

Ce diagramme présente la relation entre la température extérieure et la température opérative et donne la possibilité de déterminer la zone du confort thermique. Deux zones différentes existent dans le diagramme, la zone claire indique un taux de satisfaction à 80 % et la zone foncée exprime un taux de satisfaction de 90 %.

Conclusion

Le confort thermique est une notion subjective très complexe qui dépend de plusieurs paramètres. Il représente un état de satisfaction des usagers vis-à-vis de l'ambiance thermique sous l'influence et l'interaction de facteurs multiples. L'absence du confort thermique, génère des gestes de régulation thermique et oblige les occupants à l'exploitation des équipements

électriques de chauffage et de climatisation. L'exploitation excessive des équipements influe négativement sur la performance énergétique du bâtiment et lui donne un aspect énergivore. Pour remédier à cette situation qui s'est érigée en problème mondial, des études approfondies sur les composants des bâtiments sont menées pour tenter d'assurer le bien-être des utilisateurs et l'efficacité de la construction de manière passive.

CHAPITRE III : Le confort visuel



CHAPITRE III : Le confort visuel

Introduction

La lumière constitue un élément essentiel de la vie. Elle représente une partie indéniable de notre vécu quotidien et nous influence du point de vue physiologique et psychologique. La lumière naturelle est indispensable au confort visuel. Elle est un mélange de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, du rouge au violet. Elle est la seule lumière qui permet à l'œil d'apprécier la réelle couleur des objets et les plus délicates de leurs nuances. A cet effet, l'éclairage artificiel doit être donc considéré comme un complément à la lumière naturelle.

La lumière naturelle apparaît comme un moyen architectural particulièrement riche. Elle peut révéler un bâtiment par son action sur les espaces, les formes, les structures, les matériaux, les couleurs et les significations de l'édifice. De plus, elle est au cœur même de la définition du geste créateur : exprimer, c'est-à-dire mettre en lumière, extraire de l'ombre. Elle permet en effet de voir, de trouver, d'observer. Par ailleurs, trop de lumière, une lumière mal adaptée, mal placée, mal orientée peut s'avérer gênante. Il s'agit donc d'avoir la bonne lumière au bon endroit (selon la fonction). Un mauvais éclairage, qu'il soit naturel ou artificiel engendre à long terme une fatigue, voire même des troubles et une sensation d'inconfort.

1. Le confort visuel

L'environnement visuel procure une sensation de confort lorsqu'il est possible de voir les objets nettement et sans fatigue dans une ambiance colorée agréable. Le confort visuel est une impression subjective liée à la quantité, à la distribution et à la qualité de la lumière.

La définition d'un confort visuel optimal dépend de facteurs tout aussi variés que le type d'activité pratiqué, la configuration des lieux, l'âge, etc. La notion de confort est personnelle et multicritère. On peut définir un certain nombre de points particuliers au niveau du bâtiment sur lesquels le confort est influencé :

- Le niveau d'éclairage et la luminance ;

- Les contrastes et les couleurs ;
- L'éblouissement ;
- Les vues vers l'extérieur ;
- La mise en évidence des formes et reliefs des objets ou éléments d'architecture.

2. Les paramètres du confort visuel

Quel que soit l'usage, le confort visuel se garantit autour de 6 paramètres :

1. Un éclairage suffisant ;
2. Un éclairage uniforme ;
3. L'absence de réflexion ;
4. L'absence d'éblouissement ;
5. L'absence d'ombre ;
6. Un rendu des couleurs suffisant.

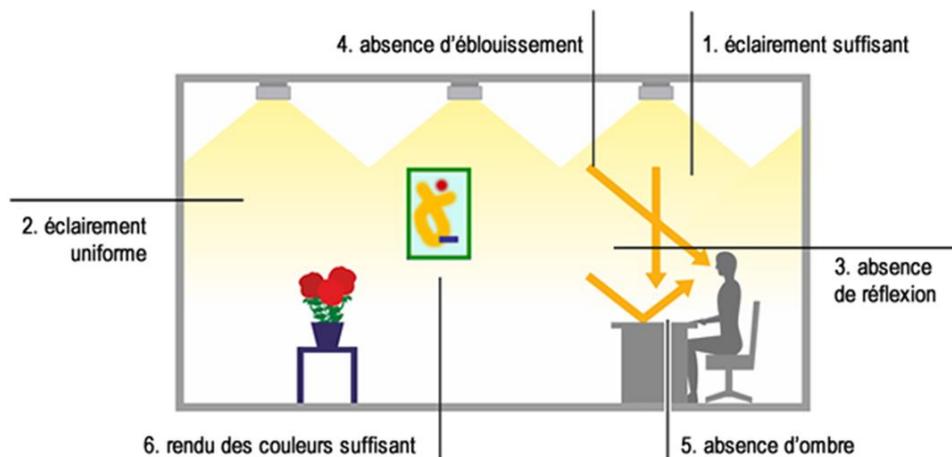


Figure 3.1 : Les paramètres du confort visuel (Source : www.energieplus-lesite.be)

Les paramètres du confort visuel pour lesquels l'architecte joue un rôle prépondérant (Figure 3.2) sont :

- a) Le niveau d'éclairage de la tâche visuelle et des surfaces de travail ;
- b) Un rendu des couleurs correct ;
- c) Une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace ;
- d) L'absence d'ombres gênantes ;
- e) La mise en valeur du relief des objets ;
- f) Une vue vers l'extérieur ;
- g) Une teinte de lumière agréable ;
- h) L'absence d'éblouissement.



Figure 3.2 : Les paramètres du confort visuel pour lesquels l'architecte joue un rôle prépondérant (Source : www.sites.uclouvain.be)

Il est cependant très difficile de quantifier les valeurs idéales que ces paramètres devraient atteindre : il n'existe en effet pas de solution universelle au problème du confort visuel car celui-ci sera influencé par le type de tâche, la configuration du lieu, et les différences individuelles. De plus, le jugement de la qualité de la lumière sera influencé par des aspects personnels, culturels et historiques.

3. Les principales sources d'inconfort visuel

L'inconfort visuel et la fatigue oculaire est bien souvent le résultat d'une utilisation excessive de nos yeux. Il s'agit d'une altération temporaire du fonctionnement de l'œil, souvent associée à un effort trop important de celui-ci. La vie connectée et les écrans omniprésents ne sont donc pas une bonne nouvelle pour nos yeux. Mais d'autres facteurs sont considérés comme sources d'inconfort visuel peuvent également favoriser la fatigue visuelle. Les principales sources d'inconfort visuel sont :

- L'éclairage insuffisant ;
- La luminosité importante ;
- La variation trop rapide de l'intensité d'éclairage ;
- Le mauvais rendu des couleurs (spectre de la lumière inadapté) ;

- L'éblouissement (trop fort contraste de luminance) ;
- Le contraste (rapport entre la luminosité d'un objet et son environnement).



Figure 3.3 : Les sources d'inconfort visuel (Source : www.sites.uclouvain.be)

Le stress visuel est un trouble du traitement perceptif qui empêche le cerveau de bien interpréter l'information visuelle qu'il reçoit. Ce trouble affecte la lecture, la capacité d'attention, la coordination ainsi que l'état de santé général et le comportement.

4. La stratégie de l'éclairage naturel

Cette stratégie consiste à capter les rayonnements et assurer la pénétration de la lumière naturelle dans la construction. Elle vise à la répartir d'une manière homogène et la focalise selon des méthodes tout en évitant l'inconfort visuel. Cette stratégie offre l'exploitation de la lumière naturelle et réduit la quantité de l'énergie électrique consacrée à l'éclairage.



Figure 3.4 : La stratégie de l'éclairage naturel

(Source : Liébard & De Herde, 2005 ; infographie Fabrice Mathé)

Les paramètres à prendre en compte sont comme suit :

- Capturer et pénétrer : à travers l'étude de la surface vitrée et le type de vitrage ainsi que la nature des surfaces de l'environnement extérieur (les réflexions extérieures) ;
- Répartir : par la prise en considération des caractéristiques du vitrage, les propriétés surfaciques internes (couleur et texture) et l'exploitation des dispositifs (réflecteurs, des obstacles, etc.) ;
- Protéger et contrôler : grâce à l'exploitation des protections solaires fixes et des éléments architecturaux (auvents, débords, réflecteurs, moucharabieh, light shelves) ou mobiles (stores, volets, etc.).
- Focaliser : à travers les différents types des ouvertures par un éclairage zénithale ou latérale afin de donner de l'importance à un élément.

5. Le facteur de lumière de jour (FLJ)

Le FLJ mesure le rapport entre l'éclairement intérieur reçu sur le plan de travail et l'éclairement extérieur sur une surface horizontale (Figure 3.5). Il s'exprime en %.

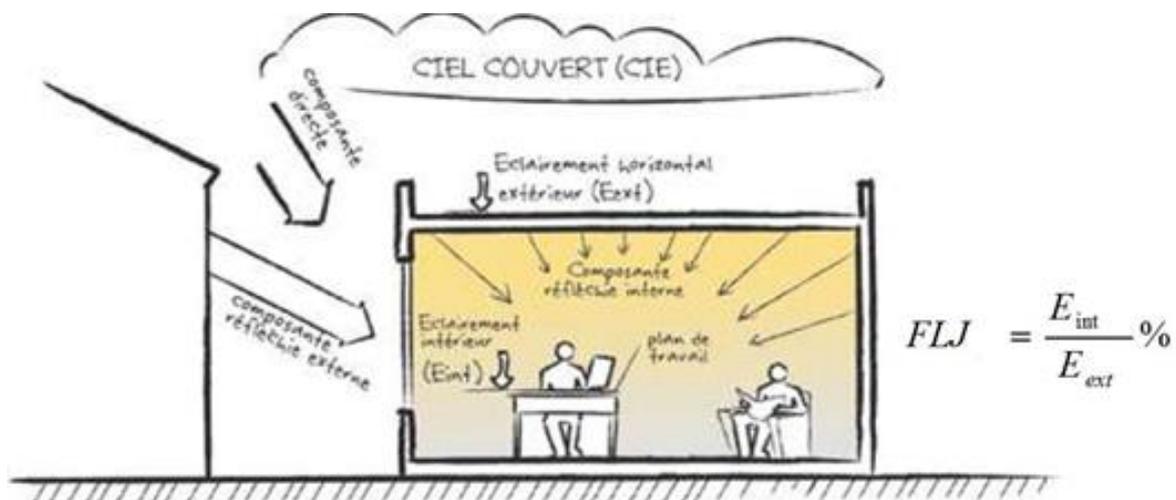


Figure 3.5 : Le facteur de lumière de jour (Source : www.bluetek.fr)

L'éclairement naturel (FLJ) est constitué de 3 composantes (Figure 3.6) :

- 1) Une composante directe du ciel : éclairage provenant directement de la partie visible du ciel ;
- 2) Une composante réfléchie extérieure : éclairage parvenant au point par réflexion sur les façades extérieures ;
- 3) Une composante réfléchie intérieure : éclairage parvenant au point par réflexion sur les faces intérieure.

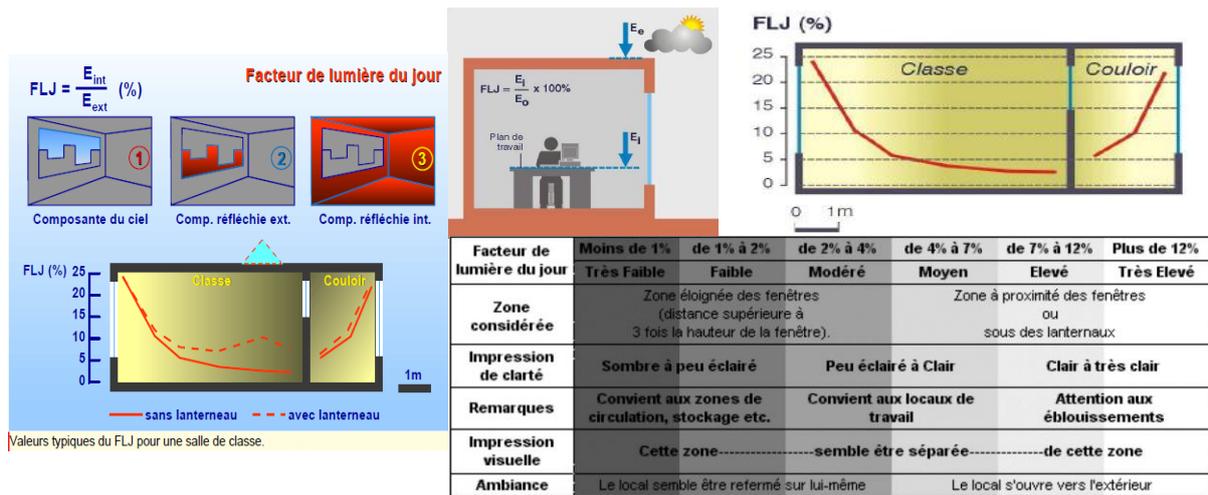


Figure 3.6 : Les composantes et les valeurs typiques du FLJ
(Source : Liébard & De Herde, 2005 ; www.mysti2d.net)

On recommande des valeurs de FLJ minimum de référence dans tout bâtiment en fonction de son utilisation.

6. La température de couleur

La couleur de la lumière doit être adaptée au niveau d'éclairage. Quand le niveau d'éclairage augmente, la température de couleur de la lumière doit également s'élever. Le diagramme de Kruithof donne à cet effet les valeurs recommandées de la température de couleur en fonction de l'éclairage (Figure 3.7). Exprimée en kelvins (K), elle est liée à l'impression visuelle produite par un éclairage artificiel. Elle varie des teintes chaudes (à dominante orangée, entre 1 000 et 3 500 K) aux teintes froides (à dominante bleutée, entre 5 000 et 8 000 K).

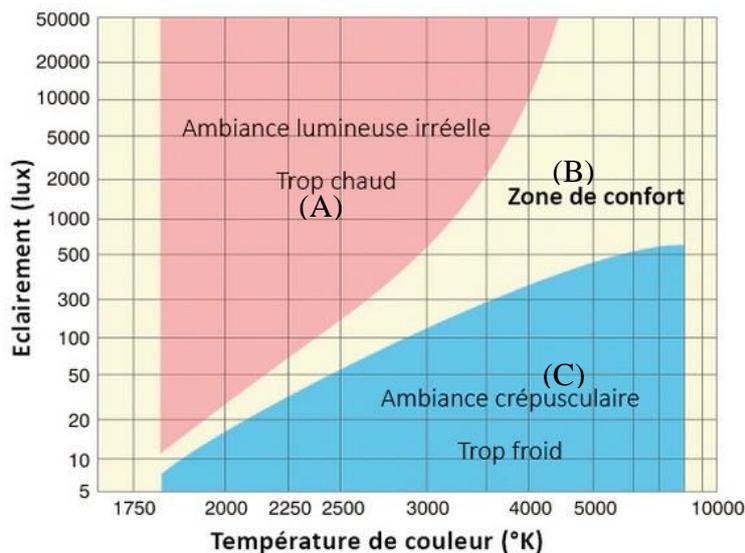


Figure 3.7 : Diagramme de Kruithof (Source : www.ffbatiment.fr)

Seule la zone (B) correspond à la zone de confort. Si quelqu'un se trouve dans la zone (A), l'impression visuelle correspond à une ambiance lumineuse irréaliste, trop chaude ; la température de couleur est trop faible pour le niveau d'éclairage considéré. Dans la zone (C), l'ambiance lumineuse, de type crépusculaire, est trop froide ; la température de couleur de la source est trop importante par rapport au niveau d'éclairage atteint.

7. La propagation de la lumière

Sans obstacle sur son trajet, la lumière se propage en ligne droite à partir d'un point lumineux. Si elle rencontre des obstacles, il apparaît des zones d'ombre et de pénombre. Lorsque la lumière arrive sur une paroi opaque, une partie de la lumière est réfléchi, une autre partie est absorbée par celle-ci. Lorsque la lumière arrive sur une paroi vitrée, une partie est réfléchi, une partie est absorbée et une autre partie est transmise au travers du vitrage.

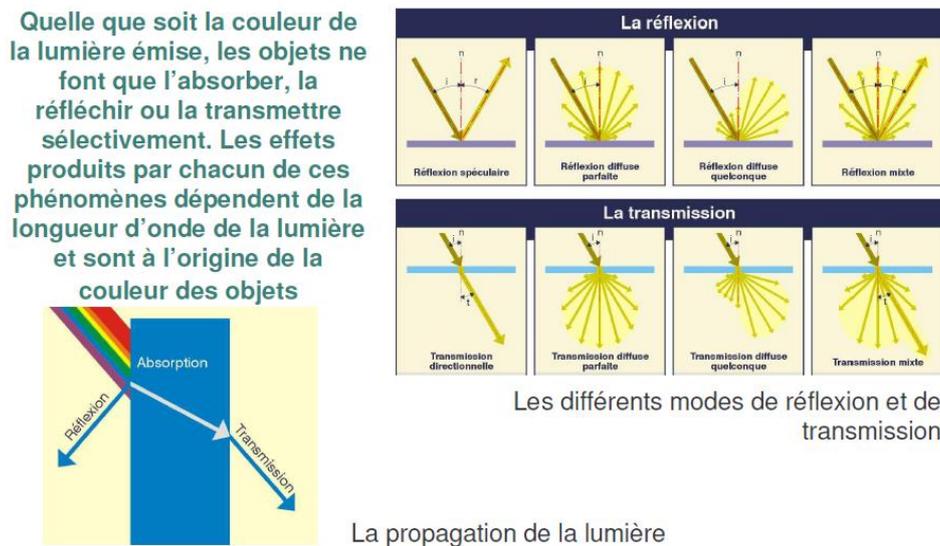


Figure 3.8 : La propagation de la lumière et les différents modes de réflexion et de transmission (Source : www.sites.uclouvain.be)

Une surface claire (blanche) réfléchit fortement la lumière. A l'inverse, une surface sombre (noire) absorbe fortement la lumière.

8. Les différents types de ciels

La partie du rayonnement solaire qui est absorbée et réémise par l'atmosphère constitue ce qu'on appelle l'éclairage provenant du ciel. La disponibilité de la lumière naturelle dépend de la position du soleil dans le ciel- définie par l'heure et la position géographique du lieu considéré - mais aussi des conditions météorologiques (couverture nuageuse), du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface, etc. Vu la multitude de conditions météorologiques

existantes, des ciels standards ont été établis pour les études d'éclairage naturel. Chacun de ces ciels est caractérisé par la répartition de sa luminance sur la voûte céleste.

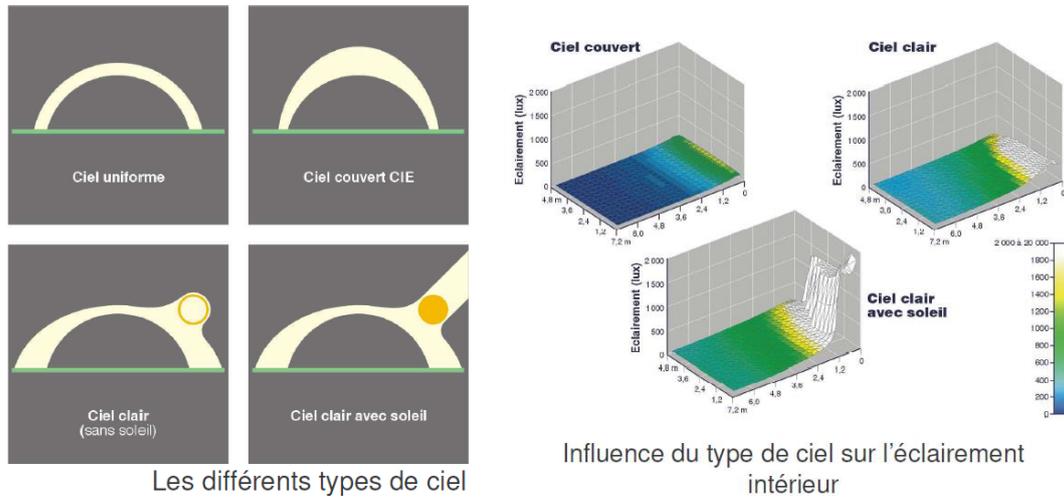


Figure 3.9 : Le type de ciel et son influence sur l'éclairage intérieur
(Source : www.sites.uclouvain.be)

Les trois modèles (ciel uniforme, couvert et clair) ne font intervenir que la composante diffuse du rayonnement solaire, le ciel clair avec soleil prend en compte son rayonnement global, c'est-à-dire la somme des rayonnements directs et diffus. Ce quatrième type de ciel correspond à un ciel serein au sein duquel le soleil brille. Le ciel clair avec soleil offre la possibilité d'étudier les jeux d'ombres et de lumière ainsi que les risques d'éblouissement dus à la pénétration du soleil dans un bâtiment.

9. Les grandeurs photométriques

Les grandeurs photométriques sont à la base de toutes les mesures en éclairage et il en existe 4 fondamentales (le flux lumineux en "lumen", l'intensité lumineuse en "candela", l'éclairage en "lux", et la luminance en "candela/m²").

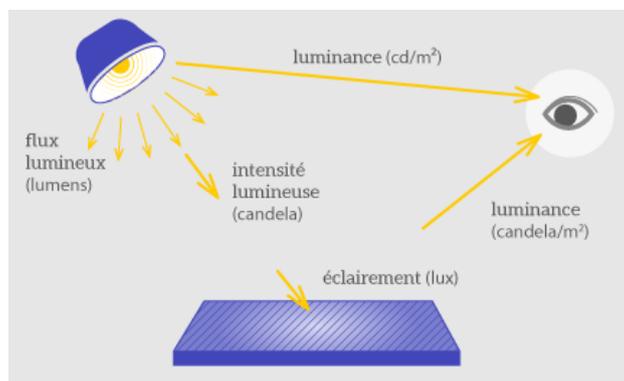


Figure 3.10 : Les grandeurs photométriques (Source : www.leclairage.fr)

9.1. Le flux lumineux

C'est la puissance lumineuse émise par une source lumineuse dans toutes les directions, exprimée en lumens (lumen).



Figure 3.11 : Le flux lumineux (Source : www.energieplus-lesite.be)

Il est utilisé pour exprimer le flux total émis par une source lumineuse afin de comparer l'efficacité lumineuse des différentes lampes.

9.2. L'intensité lumineuse

La quantité de flux lumineux émise dans une direction particulière, exprimée en « candela ». Elle décrit le flux lumineux dans une direction bien précise. Elle est en quelque sorte la capacité du flux lumineux à éclairer dans cette direction.

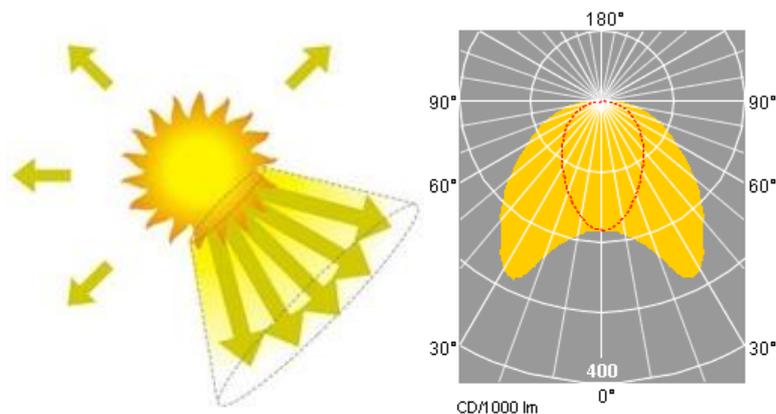


Figure 3.12 : L'intensité lumineuse (Source : www.energieplus-lesite.be)

Elle permet de caractériser les luminaires en indiquant sur un graphe leur intensité lumineuse dans les différentes directions.

9.3. L'éclairement

La quantité de lumière reçue par une surface (la quantité de flux lumineux éclairant une surface), exprimée en "lux".

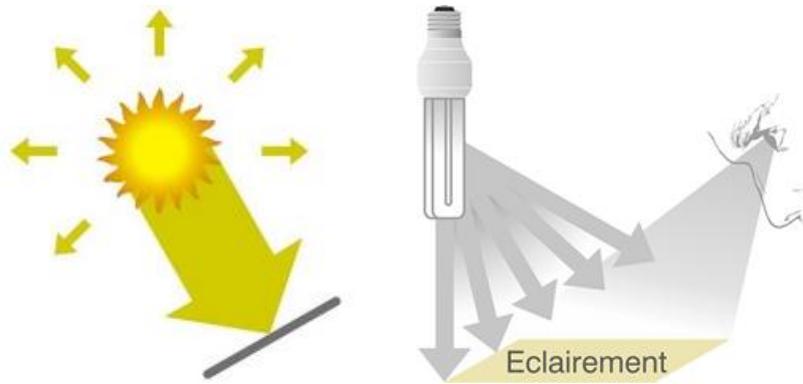


Figure 3.13 : L'éclairement (Source : www.sites.uclouvain.be)

L'éclairement est mesuré avec un luxmètre en lux ($1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen/m}^2$).

9.4. La luminance

La luminance d'une source est le rapport entre l'intensité lumineuse émise dans une direction et la surface apparente de la source lumineuse dans la direction considérée. La luminance s'exprime en candélas par mètre carré (candela/m^2).

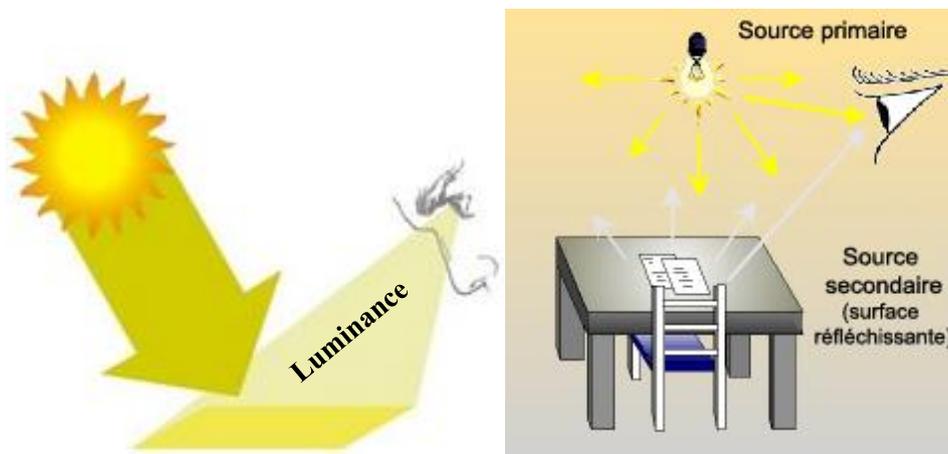


Figure 3.14 : La luminance (Source : www.sites.uclouvain.be)

Elle correspond à la « brillance » d'une surface éclairée ou d'une source lumineuse telle que perçue par l'œil humain et décrit l'effet de la lumière sur l'œil. Elle est mesurée par un "luminancemètre".

Conclusion

De nombreuses stratégies existent pour obtenir une performance en éclairage naturel tout en assurant le confort visuel des usagers, c'est à dire un éclairage confortable, agréable et permettant de réduire les consommations énergétiques liées à l'éclairage artificiel. Les retours d'expérience ont permis de mettre en évidence une certaine homogénéité dans l'origine des désordres concernant l'apport de lumière naturelle. En effet, ces désordres sont majoritairement issus de la négligence de certains paramètres lors de la phase de conception. Etant donné que les solutions actives correctives engendrent de lourdes dépenses, il est donc nécessaire de traiter efficacement le problème dès la phase de conception (implantation, orientation, ...) à travers un choix adéquat de différents éléments et dispositifs (couleur, texture, ouvertures, protection solaire, etc.) tout en prenant en compte le contexte immédiat, les masques solaires et les caractéristiques surfaciques de l'environnement interne et externe du projet.

CHAPITRE IV : Le confort acoustique

Introduction

L'acoustique est la science du son et la partie de la physique qui les étudie. C'est l'étude de la propagation et de la transmission des ondes mécaniques des sons, des infrasons et des ultrasons, selon les fréquences considérées. Cette discipline répond aux lois de la physique et comprend diverses branches comme l'acoustique architecturale, l'acoustique musicale, l'électroacoustique, la thermo acoustique, etc. L'étude de ce domaine vise à améliorer la qualité d'écoute et d'assurer le confort acoustique des usagers.

1. L'acoustique architecturale

L'acoustique architecturale s'intéresse aux problèmes acoustiques posés par le bâtiment. Elle traite en particulier des problèmes concernant la protection des locaux contre les bruits et les vibrations, et les conditions optimales d'émission et de réception des ondes sonores dans un local. De mauvaises finitions, des matériaux peu performants ou encore un isolement insuffisant des façades rendent l'intervention des acousticiens de plus en plus indispensable.

L'objectif recherché par l'étude de l'acoustique des salles est d'offrir la meilleure qualité d'écoute possible dans différents lieux, qu'ils soient dédiés au spectacle et à la musique ou qu'il s'agisse de lieux publics comme des restaurants, des cantines scolaires, des gymnases, ou bien évidemment des bureaux, tout particulièrement dans le cas d'open space. Une simple mesure acoustique du temps de réverbération en effectuant une simulation acoustique théorique ou dans des cas plus complexes en réalisant une mesure acoustique avec un phonomètre, nous permet d'évaluer l'acoustique d'une pièce et d'envisager des solutions adaptées pour chaque espace.

2. Le confort acoustique

Le confort acoustique peut se définir comme la condition psycho-physique selon laquelle un individu se trouvant immergé dans un champ sonore éprouve une sensation de bien-être en

relation avec l'activité qu'il exerce. Le confort acoustique est généralement déterminé à partir du niveau (en 'dB' Décibel) atteint dans le local.

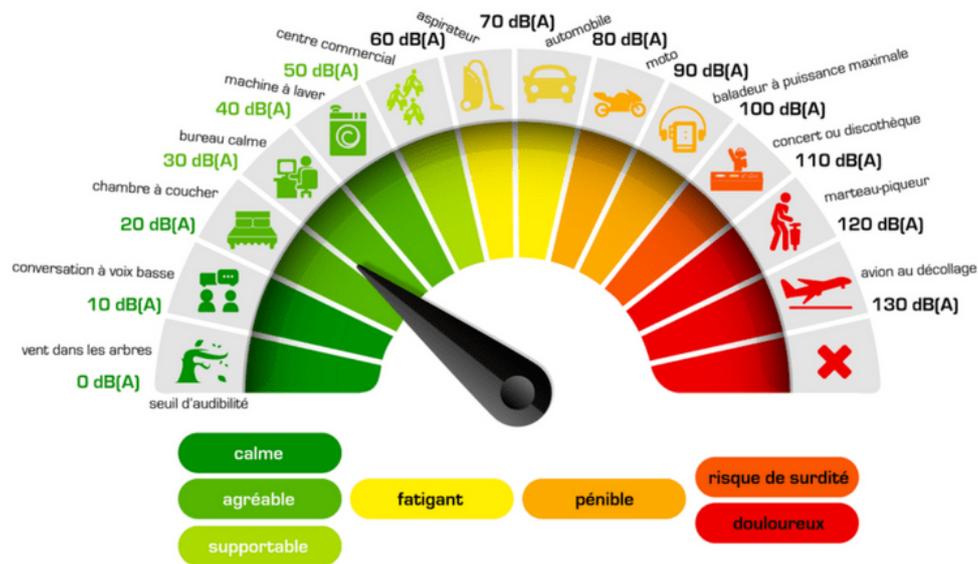


Figure 4.1 : L'échelle du bruit selon l'activité (Source : www.audilo.com)

Le confort acoustique est une notion subjective qui dépend de la perception de chaque individu. Cette perception sera influencée par divers facteurs. La figure suivante illustre un exemple sur les facteurs influençant la perception d'un bruit.

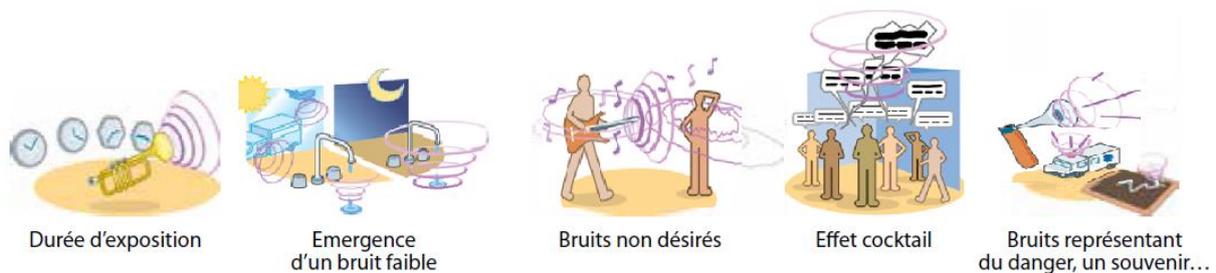


Figure 4.2 : Les facteurs influençant la perception d'un bruit

(Source : www.saint-gobain.com)

Le même bruit pourra être perçu par un individu comme une nuisance sonore du fait de sa durée d'exposition à ce bruit, de son émergence durant une période de sommeil ou du souvenir attaché à ce bruit.

3. Les notions essentielles de l'acoustique

La maîtrise de l'acoustique du bâtiment nécessite la compréhension des notions essentielles de ce domaine (le son, le bruit, la perception du bruit et la sensibilité de l'oreille, les sources et les types de bruits, etc.).

3.1. Le son

Le son est la sensation auditive engendrée par une onde acoustique qui se propage d'une source vers un récepteur dans un milieu. L'onde acoustique résulte d'une vibration de l'air due à une suite de pression et de dépression. Tout son engendré par la vibration d'un corps. Dans l'air, la vibration des molécules se transmet de proche en proche depuis la source jusqu'à l'organe de réception qui peut être un appareil de mesure ou l'oreille humaine.

Le son est caractérisé par son niveau, sa fréquence et sa durée.

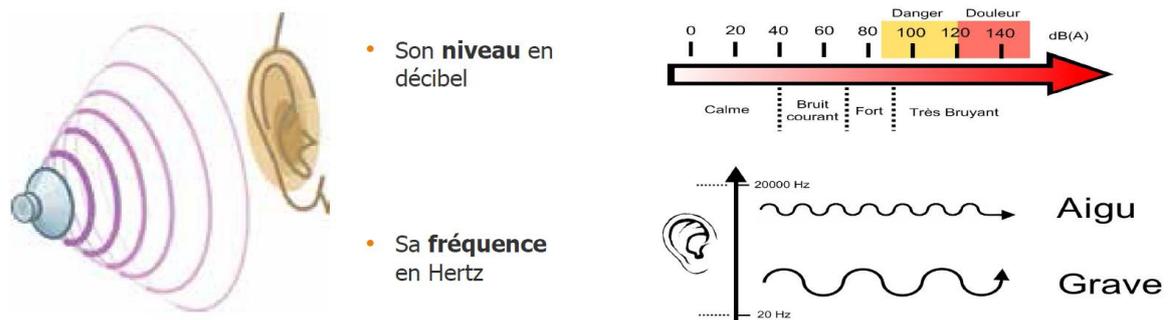


Figure 4.3 : Les caractéristiques du son (Source : www.saint-gobain.com)

Le niveau sonore s'exprime en "dB", la fréquence en "Hz" et la durée en "s".

3.1.1. Le niveau sonore (en dB)

Le niveau sonore ou niveau de pression acoustique (SPL : Sound Pressure Level) caractérise l'amplitude du son. Le niveau sonore permet de définir la puissance d'un son.

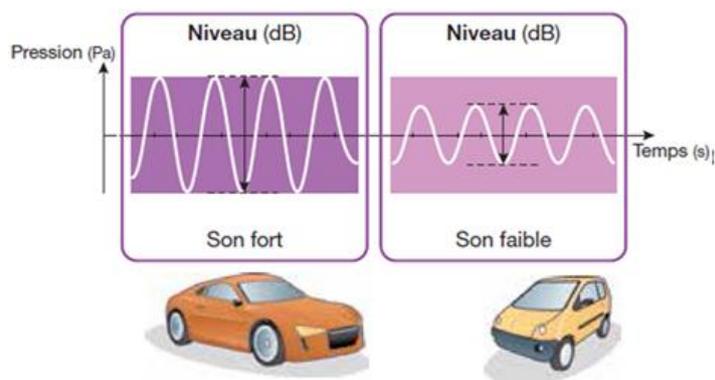


Figure 4.4 : Le niveau sonore (Source : www.saint-gobain.com)

Le niveau sonore s'exprime en Pascal (Pa). L'échelle de perception de l'oreille humaine étant très vaste, on utilise dans la pratique une échelle logarithmique pour caractériser l'amplitude sonore. Cette échelle réduite s'exprime en décibel (dB).

3.1.2. La fréquence sonore (en Hz)

Au sein de l'onde sonore la pression fluctue un certain nombre de fois autour de la pression atmosphérique. Le nombre de fluctuations par seconde définit la fréquence du son en hertz (Hz). La période T est le temps entre 2 fluctuations en seconde (s). A partir de la fréquence, on peut classer les sons en 3 catégories :

- Les sons graves (fréquence inférieure à 100Hz = basse fréquence) ;
- Les sons moyens (fréquence allant de 100 Hz à 2 kHz = moyenne fréquence) ;
- Les sons aigus (fréquence supérieure à 2 kHz = haute fréquence).

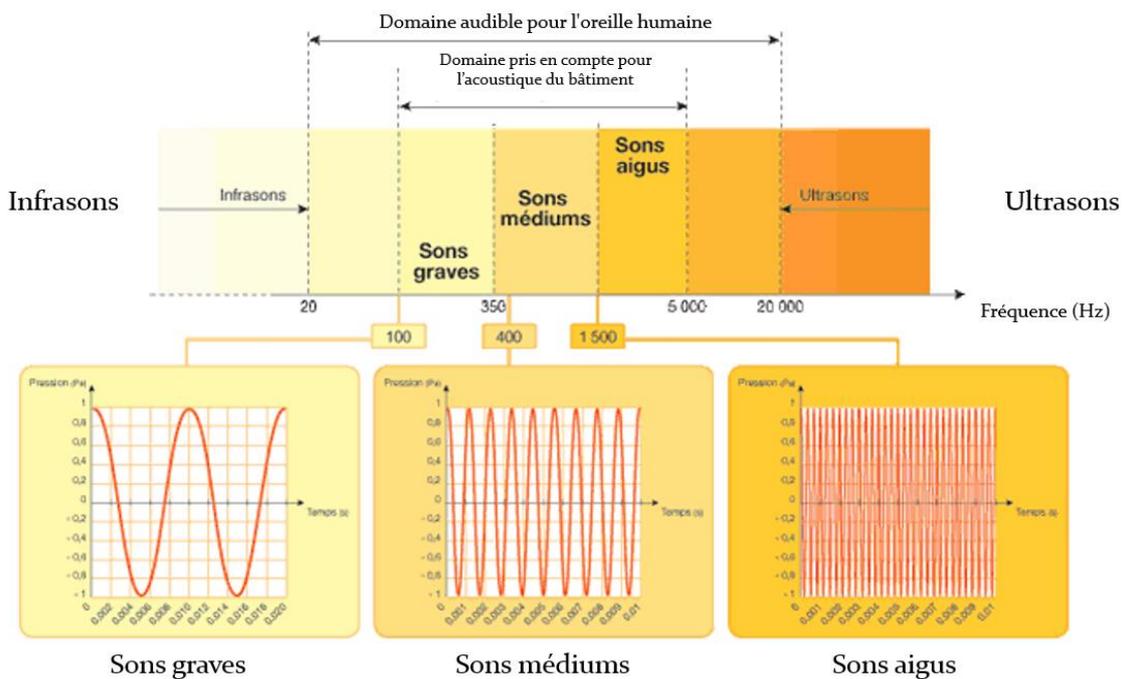


Figure 4.5 : La fréquence sonore (Source : www.spectra.fr)

Lorsque la période T est longue, la fréquence est basse, produisant un son grave. Lorsque la période T est moyenne, la fréquence est moyenne, produisant un son médium. Lorsque la période T est courte, la fréquence est élevée, produisant un son aigu.

3.2. La perception du bruit et la sensibilité de l'oreille

Le seuil d'audibilité de l'oreille humaine permet la perception des sons dont la fréquence se situe entre 20 et 20 000 Hz. Les fréquences étudiées dans le cadre de l'acoustique du bâtiment se situent entre 100 et 5 000 Hz (Figure 4.6). La zone d'émission de la parole concerne un spectre acoustique plus réduit. Ce spectre permet d'évaluer les enjeux techniques d'une paroi à isoler, en particulier lorsqu'il s'agit d'affaiblir des émissions sonores.

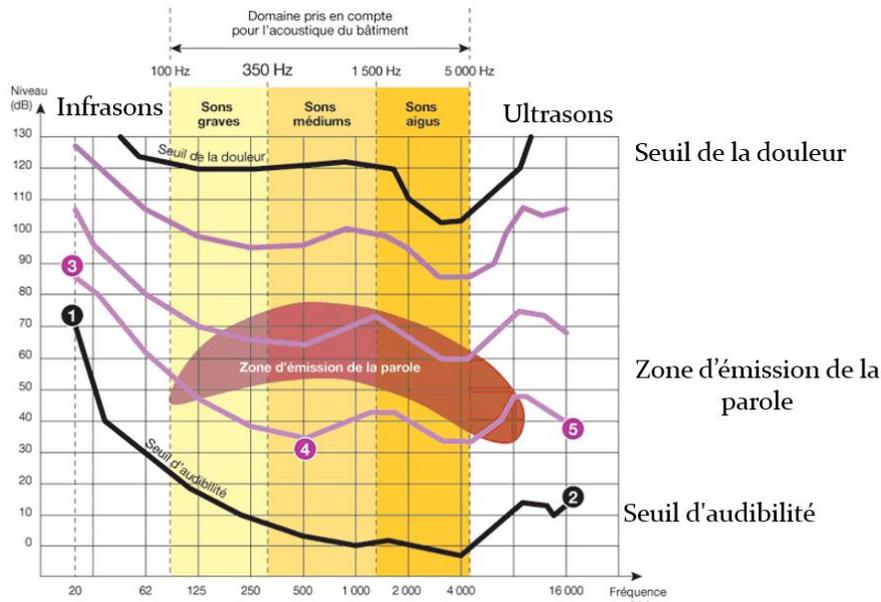


Figure 4.6 : La perception du bruit et la sensibilité de l'oreille (Source : Cloud, 2015)

La courbe de perception des sons, caractérisés en niveaux de pression et en fréquences, permet de définir des courbes dites isosoniques ou « d'égale sensation » pour l'oreille humaine. La zone d'émission de la parole concerne un spectre acoustique plus réduit. Ce spectre permet d'évaluer les enjeux techniques d'une paroi à isoler, en particulier lorsqu'il s'agit d'affaiblir des émissions sonores.

3.3. Le bruit

Le bruit fait partie intégrante de notre vie quotidienne et de notre environnement. Si une petite quantité est déterminée comme étant dans la norme, dans certaines situations d'exposition au bruit, excessives ou prolongées, peuvent avoir des conséquences néfastes pour la santé. En acoustique, le bruit est l'ensemble de plusieurs sons qui nous arrive en même temps. Lorsqu'un son résulte d'une combinaison de sons complexes non-harmoniques on parle du bruit. On parle de son d'un moteur et de bruits routiers. La notion du bruit est généralement associée à une notion de gêne (toute sensation désagréable et gênante).

Un bruit est un ensemble de sons sans harmonie. Un bruit contient de nombreuses fréquences à des niveaux différents. La sensibilité de l'oreille humaine varie en fonction de la fréquence.

3.3.1. Sources et types de bruits

Déterminer les sources du bruit, comprendre leurs modes de propagation constituent les premiers éléments à identifier avant de concevoir ou d'améliorer l'isolation acoustique d'un bâtiment (ou la correction acoustique d'un local).

On distingue trois sources de bruits dans le domaine de l'acoustique du bâtiment : les bruits aériens, les bruits solidiens (d'impacts) et les bruits d'équipements.

3.3.1.1. Les bruits aériens

Les bruits aériens se propagent via l'air ambiant. On en distingue deux catégories :

- Les bruits aériens extérieurs ou bruit routiers (trafic routier, ferroviaire ou aérien).
- Les bruits aériens intérieurs (conversation, télévision, musique, etc.).



Figure 4.7 : Les bruits aériens (Source : www.saint-gobain.com)

Dans un bâtiment, les bruits aériens se propagent par l'air avant de faire vibrer les parois du local.

3.3.1.2. Les bruits solidiens ou bruits d'impacts

Les bruits solidiens (bruits de chocs ou bruits d'impacts) se transmettent par la mise en vibration des parois et structures. Ils concernent les bruits de pas, déplacement de meubles, chute d'objet.

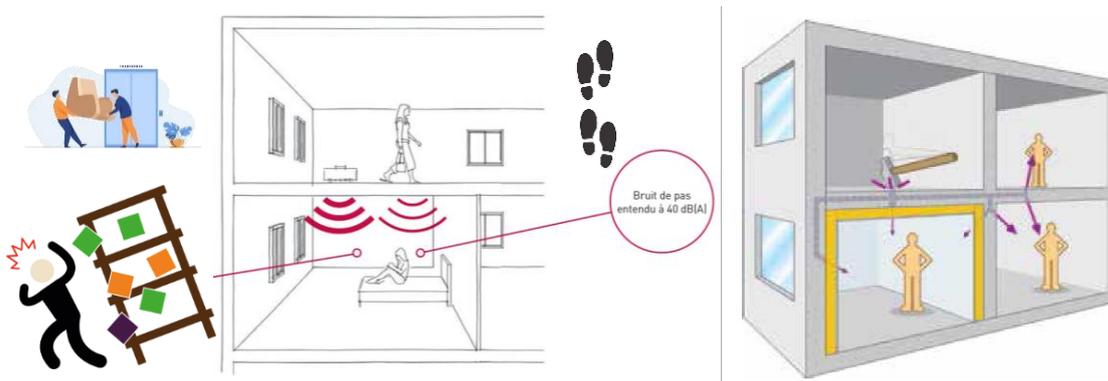


Figure 4.8 : Les bruits solidiens (Source : www.saint-gobain.com)

Lorsqu'une paroi soumise à un choc entre en vibration et fait vibrer l'air des locaux voisins, on parle de bruits solidiens.

3.3.1.3. Les bruits d'équipements

Les bruits d'équipements peuvent se transmettre à la fois via l'air ambiant et via une mise en vibration (des parois, de l'équipement...). Les bruits d'équipements concernent les ascenseurs, les conduits de ventilations, les réseaux hydrauliques, etc.

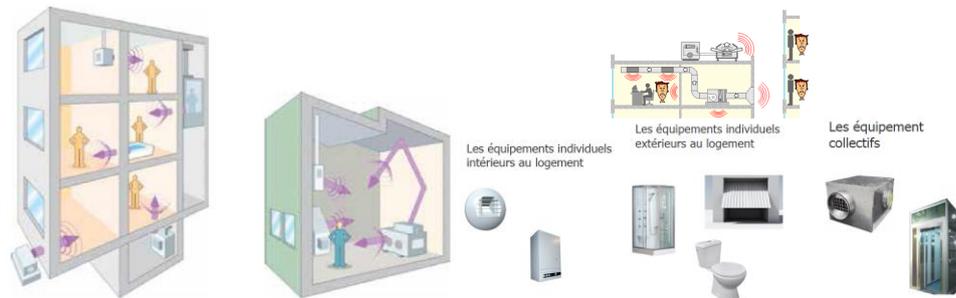


Figure 4.9 : Les bruits d'équipements (Source : www.saint-gobain.com)

La plus parts des bruits d'équipements nécessitent, pour être maîtrisés, un traitement adéquat des vibrations qu'ils engendrent.

3.3.2. La propagation des bruits

La propagation des bruits se fait principalement selon un ou plusieurs des trois modes de propagation suivant :

1. Par dispersion ;
2. Par réflexion et absorption sur un obstacle ;
3. Par transmission de la vibration aux matériaux.

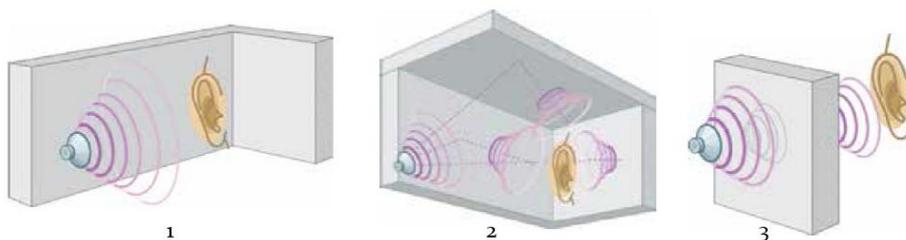


Figure 4.10 : La propagation des bruits (Source : www.saint-gobain.com)

Par dispersion: dans un espace libre on observe une dispersion de l'énergie acoustique, le niveau du bruit décroissant en fonction de la distance. La décroissance spatiale des bruits aériens peut être quantifiée en fonction de la source du bruit. Par réflexion et absorption sur un obstacle: on observe alors un phénomène de réverbération d'une partie de la vibration sur les parois et les obstacles rencontrés. Par transmission de la vibration aux matériaux: le bruit se propage par les éléments solides (parois, structures...).

3.3.3. Les chemins de transmissions

Il y a 3 chemins de transmissions : les transmissions directes, les transmissions latérales (indirectes) et les transmissions parasites.

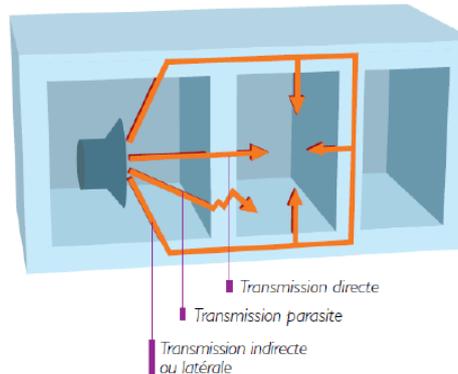


Figure 4.11 : Les chemins de transmissions (Source : www.alec-nancy.fr)

- Transmissions directes : par les parois séparatives (murs, plancher, plafond, cloison, fenêtre).
- Transmissions latérales (indirecte): par les parois non séparatives.
- Transmissions parasites : par les imperfections localisées (boîtiers électriques,...) et défauts d'étanchéité à l'air.

3.3.4. Les règles d'addition des niveaux du bruit

Le niveau sonore s'exprime selon une échelle logarithmique, les règles d'addition classiques ne s'appliquent donc pas aux niveaux du bruit. Par exemple, deux conversations identiques et simultanées dont le niveau sonore est de 50 dB, ne donneront pas un niveau sonore de 100 dB, mais un niveau sonore de 53 dB. Les règles d'addition applicables en fonction des niveaux du bruit considérés :

3.3.4.1. Si les bruits sont de niveaux voisins (écart < 10 dB)

Si les niveaux du bruit sont similaires, l'évaluation du niveau du bruit résultant se fait par addition au niveau du bruit le plus fort d'une valeur donnée dans le tableau suivant.

Tableau 4.1 : Les règles d'addition des niveaux du bruit si l'écart est inférieur à 10 dB
(Source : Cloud, 2015)

Différence entre deux niveaux sonores (en dB)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valeur à ajouter au niveau le plus fort (en dB)	3,0	2,6	2,1	1,8	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5

Une multiplication par 10 de la puissance acoustique entraîne une augmentation de 10 dB. ($50 \text{ dB} \times 10 = 60 \text{ dB}$).

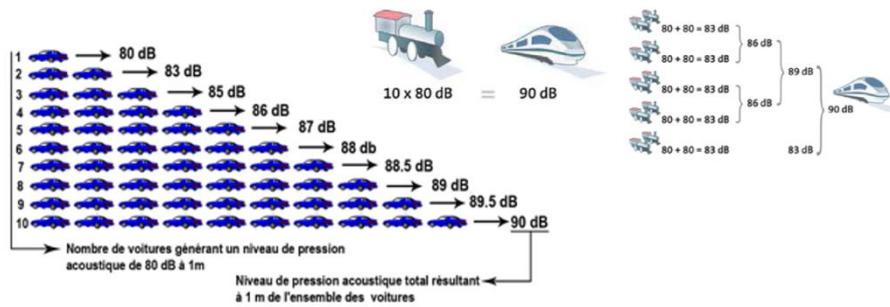


Figure 4.12 : Les règles d’addition des niveaux du bruit si l’écart est inférieur à 10 dB (Source : Cloud, 2015)

3.3.4.2. Si les bruits sont de niveaux très différents (écart > 10 dB)

Si l’écart des niveaux du bruit est supérieur à 10 dB, le bruit le plus fort masque le plus faible.



Figure 4.13 : Les règles d’addition des niveaux du bruit si l’écart est supérieur à 10 dB (Source : Cloud, 2015)

C’est l’effet « de masque » lorsque qu’un son est rendu inaudible par un autre.

3.3.5. L’échelle des niveaux du bruit

L’intensité d’un bruit est indiquée par rapport à une échelle de référence allant de 10 à 130 dB. L’échelle des niveaux du bruit permet d’organiser des bruits courants en fonction de la perception de l’oreille humaine : de l’ambiance calme d’une conversation à voix basse aux nuisances sonores provoquées par un avion au décollage.

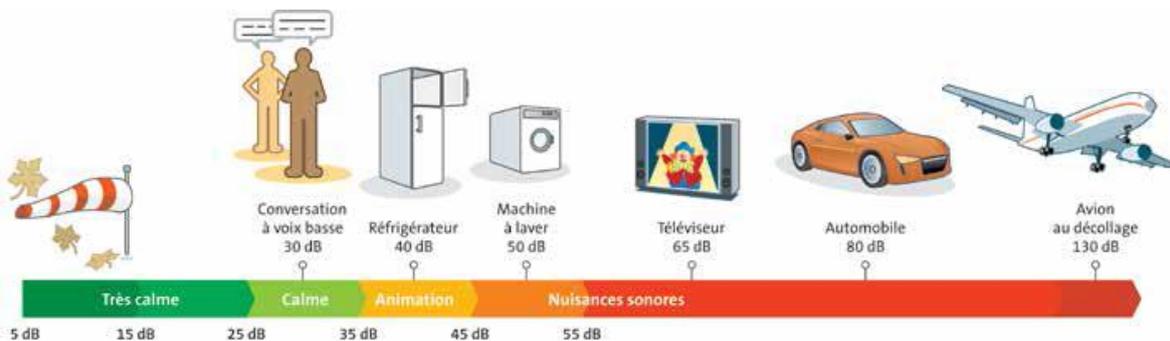


Figure 4.14 : L’échelle des niveaux du bruit selon la source (Source : Cloud, 2015)

- 10 à 40 dB : bruits légers (bruissement du vent dans les feuilles, désert, intérieur calme).
- 40 à 60 dB : bruits supportables (bureau calme, conversation à niveau normal).
- 60 à 80 dB : bruits gênants (rue très animée, télévision, cantines).
- 80 à 100 dB : bruits fatigants à dangereux (passage d'un train, musique forte).
- 100 à 130 dB : bruits dangereux à douloureux (seuil de la douleur. Atelier, marteau-piqueur, moteur d'avion à réaction au sol).

3.4. Le temps de réverbération

Le temps de réverbération d'une pièce est le temps nécessaire pour que le son diminue de 60 dB après l'extinction de la source sonore. Le temps de réverbération a été théorisé par la Formule de Sabine, il est ainsi symbolisé TR60 ($TR60 = 0,16 V/A$). Il varie selon la géométrie et le revêtement des parois de la salle.

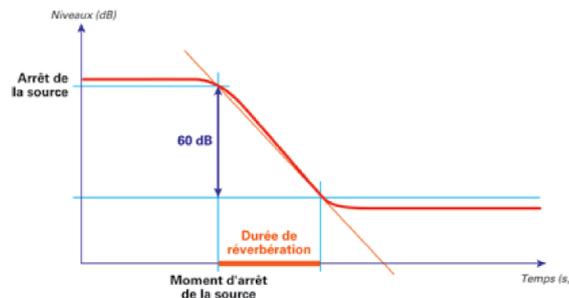


Figure 4.15 : Le temps de réverbération (Source : Cloud, 2015)

Elle résulte du mélange de diverses réflexions directes et indirectes d'ondes sonores. Elle est la réverbération du son sur les parois d'une pièce qui provoque l'effet d'écho. Voilà pourquoi la correction acoustique permet d'y remédier en maîtrisant la propagation du son afin d'en diminuer le niveau sonore.

4. La plage de confort acoustique

La figure suivante illustre la plage de confort acoustique (en vert) et les bruits courants.

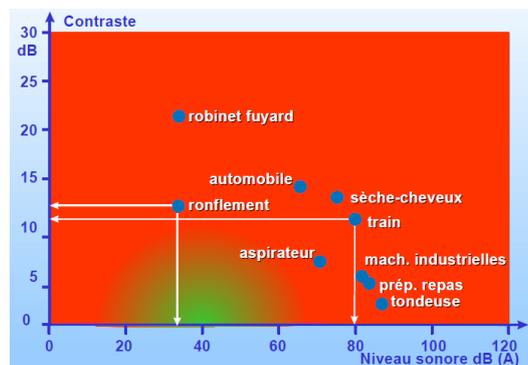


Figure 4.16 : Plage de confort acoustique (Source : Liébard & De Herde, 2005)

Cette figure rassemble les critères de niveau sonore et l'effet de contraste en situant une plage de confort et la position relative de divers bruits courants. Bien qu'ayant un niveau sonore très inférieur, un ronflement peut être ressenti comme aussi inconfortable que le bruit d'un train. Il est également important de noter que l'absence du bruit ($dB < 30$) n'est pas confortable.

5. L'isolation et la correction acoustique

Le choix d'un ensemble de dispositifs constructifs de correction ou d'isolation acoustique dépend de la nature du bruit et du confort acoustique requis dans un lieu déterminé.

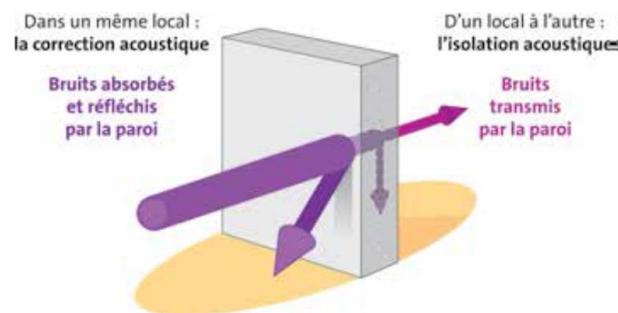


Figure 4.17 : L'isolation et la correction acoustique (Source : www.saint-gobain.com)

5.1. L'isolation acoustique

L'isolation acoustique vise à se protéger des bruits émanant de l'extérieur du local considéré. Elle représente l'ensemble des techniques destinées à réduire la transmission du bruit :

- De l'espace extérieur vers l'intérieur d'un local ;
- De l'intérieur d'un local vers l'extérieur;
- Entre deux ou plusieurs locaux d'un même bâtiment.

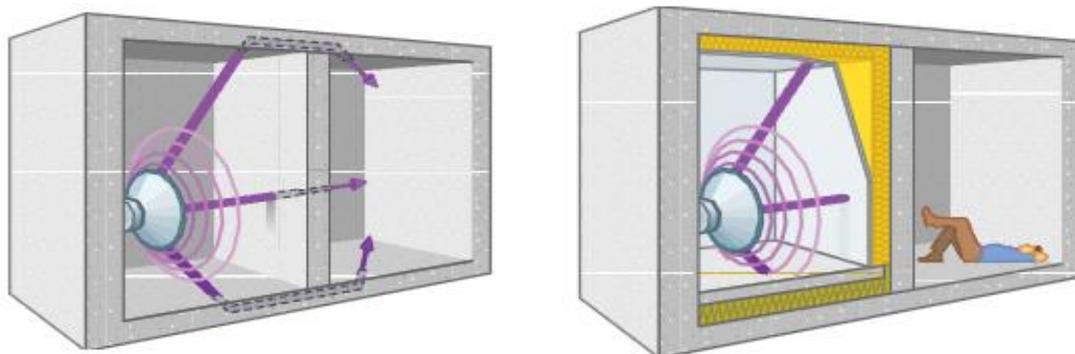


Figure 4.18 : L'isolation acoustique (Source : www.saint-gobain.com)

La source sonore est toujours extérieure au local à protéger. On parle d'isolation acoustique lorsqu'on met en œuvre des solutions pour limiter la transmission du bruit au travers des parois, en agissant sur la structure même de celle-ci.

5.2. La correction acoustique

La correction acoustique traite de la réponse d'un local où se trouvent simultanément la source du bruit et les occupants. Elle est utilisée pour traiter le confort acoustique à l'intérieur d'un local. On parle de correction acoustique lorsqu'on modifie la capacité d'absorption et de réflexion d'une ou de plusieurs parois en agissant sur leur texture, leur relief, leur géométrie et les matériaux de revêtement.

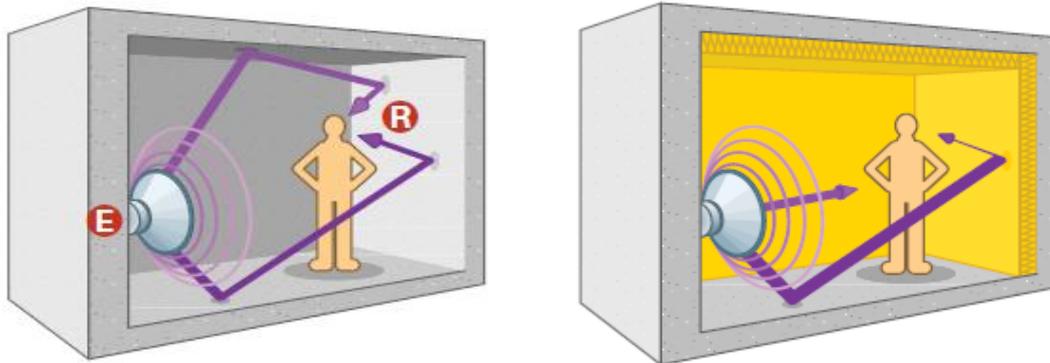


Figure 4.19 : La correction acoustique (Source : www.saint-gobain.com)

Selon l'usage du local, l'objectif recherché est de :

- Améliorer les conditions d'écoute (salles de classe, auditorium) ;
- Diminuer le niveau sonore (restaurants, bureaux, halls d'immeuble) ;
- Diminuer le niveau sonore pour favoriser l'écoute (réduire le rapport signal/bruit).

6. L'acoustique intégrée au projet

L'acoustique au sens traditionnel est une activité faite de théâtres, d'auditoriums, de salles de musique et d'écoute destinées à un usage audio professionnel où tout est mesuré en termes de performances où chaque élément du projet repose sur des calculs et des mesures instrumentales tangibles. Au fil du temps, l'application de l'acoustique a beaucoup évolué et les concepts généraux de l'acoustique se sont largement étendus à de nouveaux domaines d'application, de l'architecture à l'ameublement, du design d'intérieur au secteur aérospatial.

Les concepts d'isolation acoustique, d'insonorisation, de réverbération et de phono-absorption sont aujourd'hui bien connus des ingénieurs et architectes. Il est pourtant encore fréquent aujourd'hui de souffrir des effets d'une mauvaise acoustique dans des bâtiments de construction récente.



Figure 4.20 : Le design intégré à l'acoustique (Source : Van-Damme, 2017)

Les nombreux projets d'architecture et d'aménagement des espaces qui prévoient l'interaction entre l'homme, l'environnement et des produits industriels divers ne peuvent omettre désormais de procéder à l'analyse détaillée des conséquences de leurs choix sur le confort acoustique perçu.

Conclusion

L'acoustique architecturale est un domaine très vaste, il traite les problèmes acoustiques liés au bâtiment afin d'assurer le confort acoustique des utilisateurs à travers l'exploitation de différentes stratégies d'isolation et de correction acoustique. Les caractéristiques spécifiques des matériaux utilisés dans le domaine acoustique et le caractère relativement récent des produits de ce secteur pouvant parfois créer certaines difficultés techniques lors de la conception du projet architecturale. Ceci est d'autant plus vrai en l'absence de compétences spécifiques, capables d'orienter les choix liés à la conception du projet, afin de conjuguer les solutions acoustiques existantes avec les aspects fonctionnels récurrents et le résultat esthétique final.

CHAPITRE V : La performance énergétique des bâtiments



« La maîtrise de l'énergie n'est pas un médicament que l'on prend en période de crise, de maladie, mais une hygiène de vie qui permet de rester en bonne santé »

Pierre Radanne

Ancien directeur de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ADEME

CHAPITRE V : La performance énergétique des bâtiments

Introduction

L'efficacité énergétique et le confort sont deux attentes critiques pour le secteur du bâtiment. À ce propos, l'énergie a toujours constitué un souci pour l'homme afin d'améliorer son confort. Le sujet de l'efficacité énergétique est devenu une thématique d'actualité au niveau mondial vu son importance ainsi que les conditions environnementales et économiques actuelles. L'importance de ce sujet génère plusieurs recherches englobant tous les secteurs dans tous les domaines, particulièrement le secteur du bâtiment.

D'après un rapport élaboré par le Conseil Mondial de l'Énergie CME¹, « *Les systèmes énergétiques mondiaux sont parvenus à un seuil critique, et les décisions que nous prenons aujourd'hui influenceront indubitablement nos modes de vies sur plusieurs décennies* ».

1. La consommation énergétique mondiale

Après la première crise pétrolière de 1973 ainsi que l'apparition des problèmes environnementaux, la gestion des ressources épuisables est devenue un enjeu majeur. Des actions ont été faites afin de promouvoir l'efficacité énergétique d'où la politique mondiale a été orientée vers la rationalisation de l'utilisation de l'énergie au niveau de tous les secteurs. La figure 5.1 présente une carte de la consommation énergétique à l'échelle mondiale en 2020. Pour plus de précision, la consommation énergétique dans la plus part des pays est estimée entre 100 et 400 TWh (Térawat-theure). Par contre, les pays industriels ont une immense consommation énergétique qui dépasse la valeur de 3000 TWh.

¹ Conseil Mondial de l'Énergie (World Energy Council "WEC"), fondé en 1923 dont l'objectif est de donner l'aide aux décideurs politiques afin de mieux comprendre le domaine énergétique ainsi que pour promouvoir la fourniture et l'utilisation durables de l'énergie, il regroupe aujourd'hui plus de 90 pays (www.worldenergy.org).

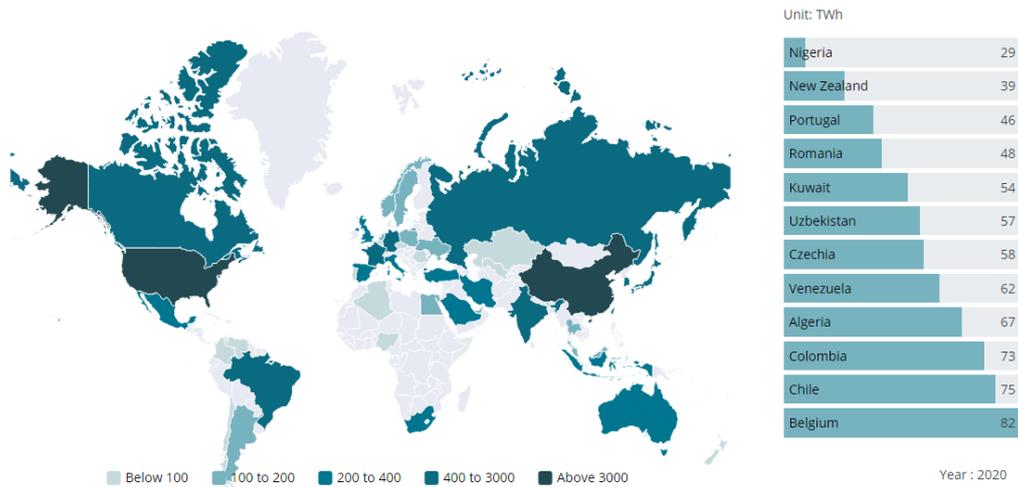


Figure 5.1 : La consommation énergétique au niveau mondial en 2020

(Source : www.yearbook.enerdata.net²)

Au niveau mondial, la consommation énergétique du secteur du bâtiment représente un pourcentage très élevé par rapport aux autres secteurs. Il est responsable d'une part importante de 40 à 45 % de la consommation totale d'énergie. La figure suivante illustre un exemple de la consommation énergétique par secteur d'un pays européen.

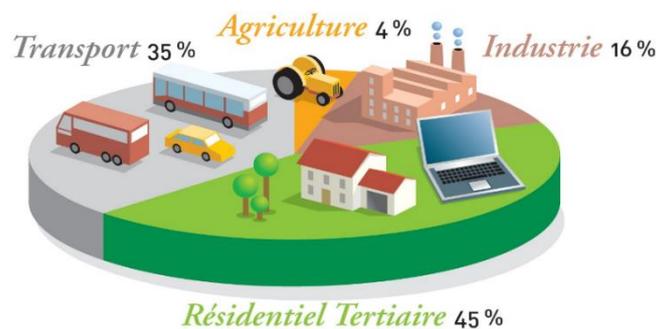


Figure 5.2 : Exemple de la consommation énergétique par secteur (Source : OREMIP³)

Pour cette raison, les chercheurs considèrent le secteur du bâtiment comme un consommateur d'énergie de premier plan et voient que le bâtiment est « le plus gourmand en ressources ».

2. La consommation énergétique en Algérie

La consommation énergétique en Algérie a connu une augmentation considérable en particulier pendant la dernière décennie. La figure 5.3 démontre la consommation énergétique de l'Algérie entre 1990 et 2020.

² Annuaire statistique de l'énergie mondiale d'Enerdata, www.yearbook.enerdata.net

³ Observatoire Régional de l'Énergie de Midi-Pyrénées, Les chiffres clés de l'énergie et des gaz à effet de serre en Midi-Pyrénées (2015), www.oremip.fr

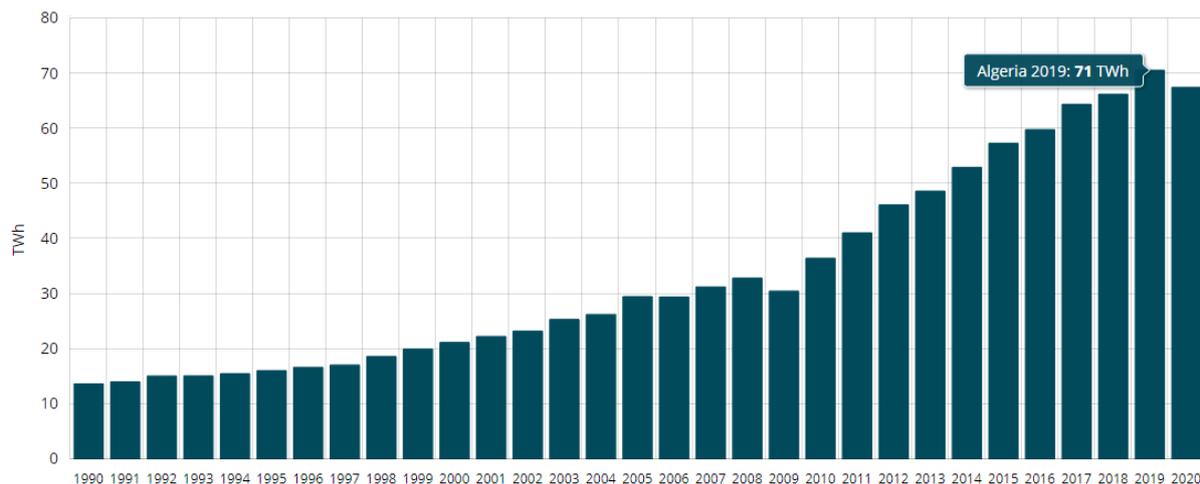


Figure 5.3 : La consommation énergétique de l'Algérie entre 1990 et 2020

(Source : www.yearbook.enerdata.net)

La consommation énergétique en 2019 est de l'ordre de 71 Twh (Térawat-theure) ce qui représente une valeur qui dépasse le double de la consommation en 2009 (après dix ans) ce qui laisse à poser beaucoup de questions sur la consommation énergétique future et ses impacts. Cette situation nécessite la détermination du problème et l'exploitation des solutions et des stratégies efficaces au niveau de tous les secteurs.

Selon le rapport de l'APRUE⁴ (2019), la consommation énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires en Algérie représente 43 % de la consommation finale (Figure 5.4).

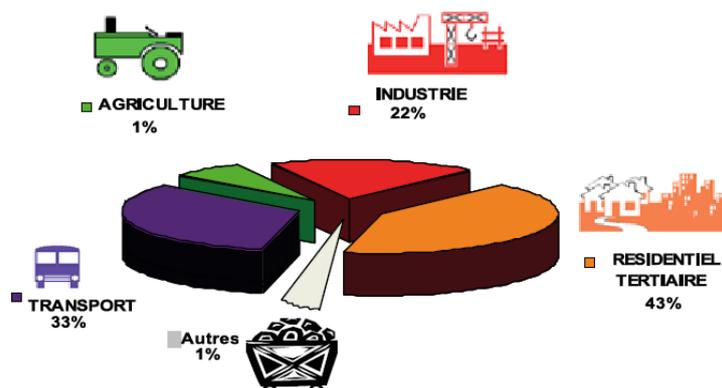


Figure 5.4 : La Consommation énergétique finale de l'Algérie par secteur

(Source : APRUE, 2019)

Le secteur du bâtiment en Algérie surpasse les autres secteurs concernant la consommation énergétique finale.

⁴ L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie.

3. La performance énergétique des constructions

Traditionnellement, le problème de l'efficacité énergétique était vu plutôt comme un problème d'ingénierie. Les architectes faisaient la conception du bâtiment et les ingénieurs arrivaient ensuite avec des systèmes mécaniques pour conditionner la température, l'éclairage et la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment. La figure suivante illustre l'impact du choix aléatoire des matériaux sur le fonctionnement thermique de la façade.

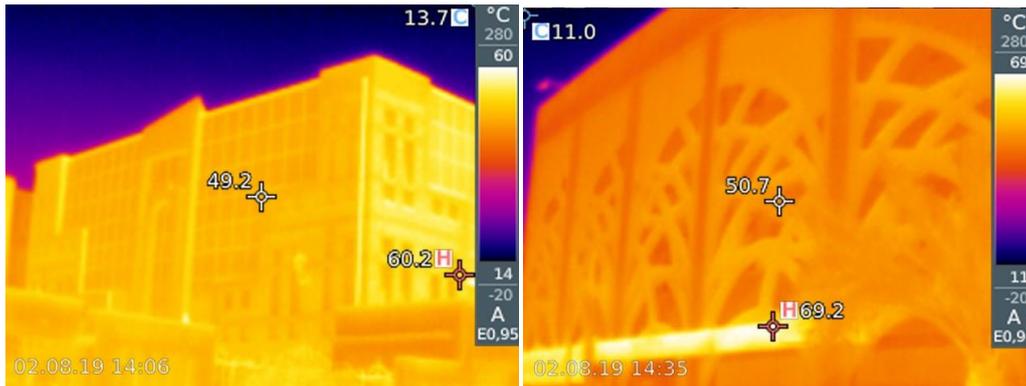


Figure 5.5 : L'impact du choix aléatoire des matériaux sur le fonctionnement thermique de la façade (Source : Auteur, 2019)

Après le choc pétrolier de 1973, plusieurs paramètres, notions et éléments ont changé, entre autres les conceptions architecturales des constructions et leurs consommations énergétiques. Dans cette optique, plusieurs initiatives ont été mises en place afin d'assurer le confort des occupants tout en minimisant la consommation énergétique du bâtiment. Pour résoudre les problèmes énergétiques, il faut établir une politique environnementale d'efficacité énergétique des constructions qui nécessitent des choix adéquats afin de corriger l'erreur et le comportement des usagers.

L'efficacité énergétique d'une construction est définie comme la quantité d'énergie qui répond aux besoins relatifs à l'énergie indispensable pour le fonctionnement normal de la construction. Elle consiste à établir une conception adéquate de tous les paramètres et un traitement bien adapté de l'enveloppe du bâtiment. La construction performante du point de vue énergétique et celle qui est bien conçue et prend en considération l'efficacité de quatre aspects suivants : la géométrie, l'enveloppe, les matériaux de construction et les systèmes.

La conception d'un bâtiment performant commence par le contrôle des pertes thermiques, des gains solaires et l'utilisation efficace de la lumière naturelle. En effet, tous ces choix et décisions sont la tâche et la responsabilité de l'architecte.

La figure suivante illustre les aspects conceptuels nécessaires pour une construction performante énergétiquement.

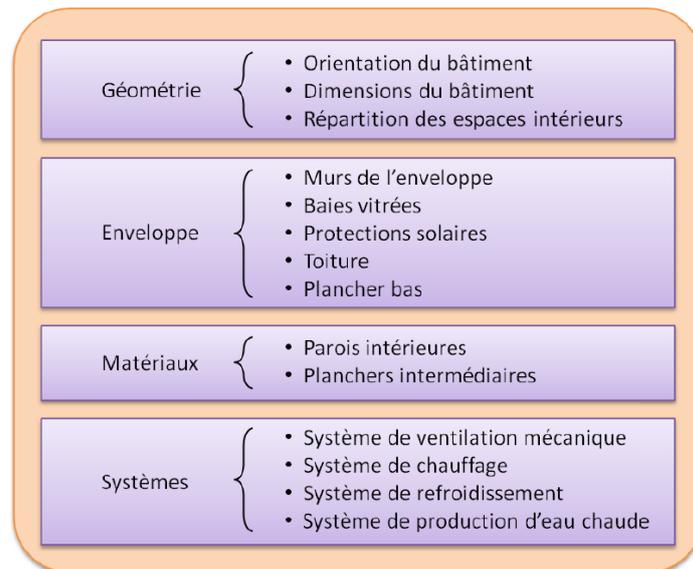


Figure 5.6 : Les aspects conceptuels nécessaires pour une construction performante énergétiquement (Source: Velázquez-Romo, 2015)

L'aspect géométrique englobe le volume du bâtiment, ses dimensions, l'orientation et la distribution spatiale interne. Concernant l'enveloppe, il faut prendre en compte les échanges thermiques avec l'extérieur (les gains et les pertes) et les différents dispositifs de protections. À propos des matériaux, il faut bien étudier leurs caractéristiques thermiques (l'inertie et l'isolation thermique). Par rapport aux systèmes, le but est d'exploiter un élément efficace qui consomme moins d'énergie (systèmes de ventilation, de refroidissement, de chauffage, etc.).

Selon les travaux de la littérature, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments dépend de deux solutions, une solution passive et une autre active (Figure 5.7). La réduction de la consommation énergétique par la solution passive basée sur l'augmentation de l'isolation thermique des parois extérieures. Les solutions actives comportent l'intégration des équipements efficaces et des systèmes adéquats (les équipements de chauffage et de la climatisation) ainsi que le contrôle de leurs fonctionnements et de leurs régulations, etc.

Pour plus de détails, les solutions passives consistent à maîtriser les paramètres suivants:

- L'orientation ;
- La forme et la compacité du bâtiment ;
- Les matériaux et l'isolation thermique ;
- La surface vitrée et la performance du type de vitrage (double, triple, etc.) ;

- La bonne étanchéité à l'eau et à l'air ;
- La maîtrise de la ventilation naturelle, etc.

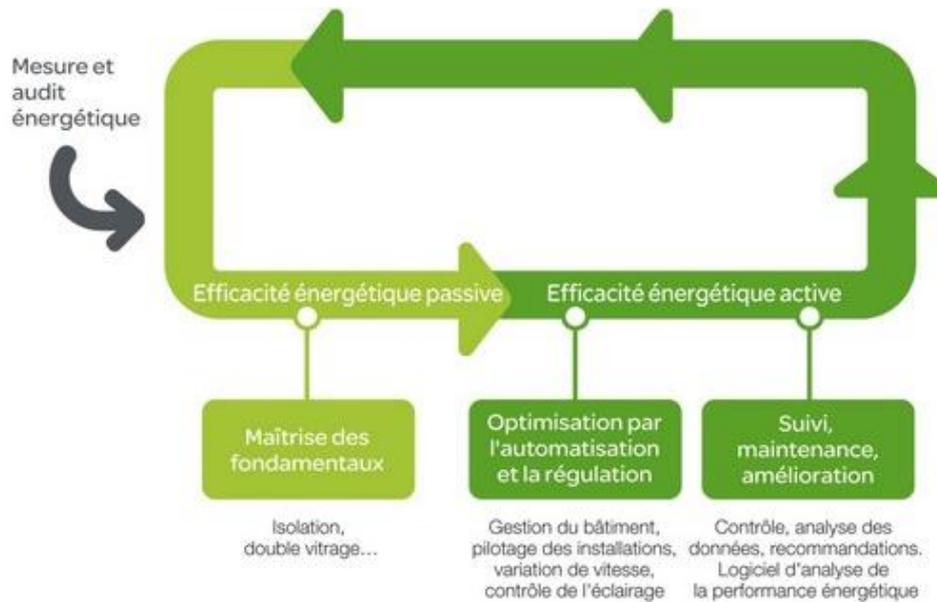


Figure 5.7 : Les solutions passives et actives de l'efficacité énergétique des bâtiments

(Source : www.schneider-electric.com)

L'implantation de la construction dans un site (exposé ou protégé) et dans son environnement immédiat (naturel ou urbain) est une étape essentielle dans le processus de la conception architecturale qui influe d'une manière importante sur le fonctionnement de la bâtisse et sa performance sur plusieurs plans (Figure 5.8).

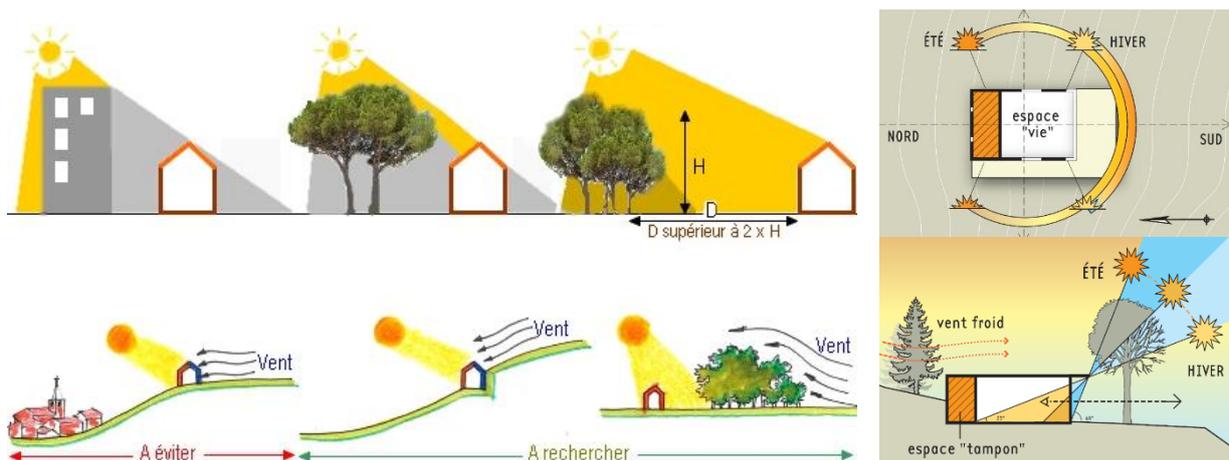


Figure 5.8 : L'impact du site et l'environnement immédiat sur le bâtiment

(Source : Miquey, 2010)

Cette étape fondamentale nécessite une analyse approfondie sur les caractéristiques du site et ses spécificités, la détermination des potentielles et les problèmes (les avantages et les

inconvénients) afin d'aboutir à une conception adéquate et performante en harmonie avec le climat, l'environnement et les besoins des occupants.

La morphologie du bâtiment est un paramètre très important qui détermine les surfaces d'échange entre l'intérieur et l'extérieur ce qui influe sur la performance énergétique de la construction. L'exploitation optimale de l'enveloppe du bâtiment est un principe essentiel de l'architecture bioclimatique. La figure suivante illustre une démonstration relative à l'impact de différentes formes de la même surface du sol occupée sur le changement de la surface d'échange avec l'extérieur.

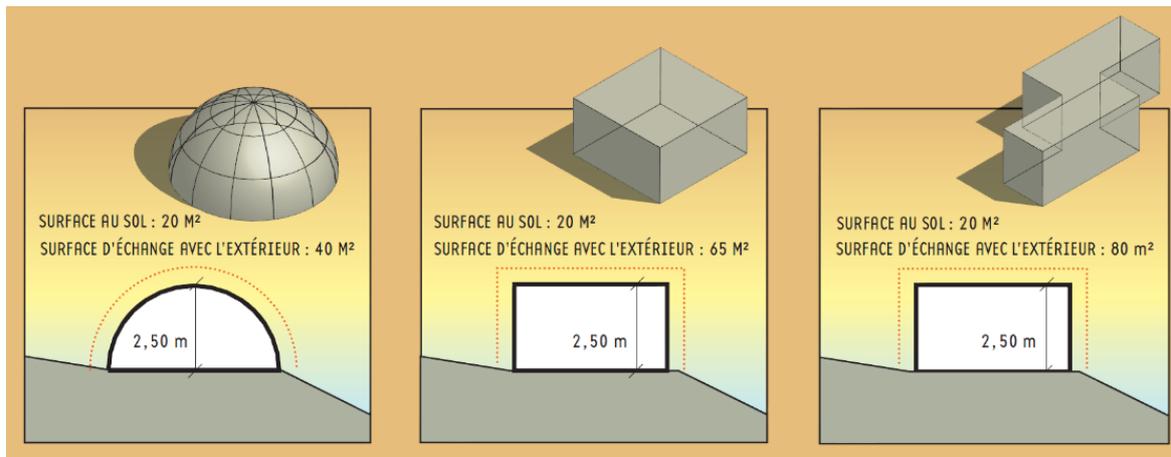


Figure 5.9 : L'impact de la forme sur la surface d'échange (Source : Misse, 2011)

La forme qui représente moins de surfaces d'échange avec l'extérieur est celle qui est caractérisée par la compacité du volume. La compacité ou le coefficient de forme (Cf) permet de qualifier les volumes construits et le degré de l'exposition de ses surfaces aux conditions climatiques. Ce coefficient est mesuré par le rapport entre les surfaces de l'enveloppe en contact avec l'extérieur sur le volume habitable comme le démontre la formule suivante :

$$Cf = \frac{S (m^2)}{V (m^3)}$$

Un coefficient de forme (Cf) faible indique que la forme est compacte, donc moins de surfaces d'échange avec l'extérieur et moins de déperditions énergétiques. Le cas contraire, si le coefficient de forme (Cf) est élevé, donc il y a plus de surfaces exposées qui engendrent de grandes déperditions énergétiques.

La distribution des espaces intérieurs ou le « zonage thermique » a des impacts sur les ambiances internes du bâtiment.

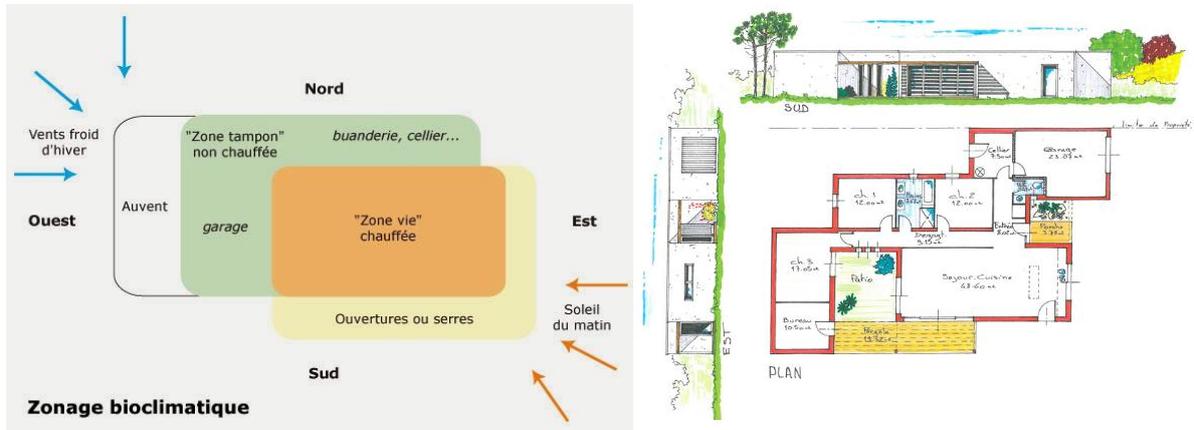


Figure 5.10 : Exemple d'un zonage bioclimatique d'un projet à usage d'habitation
(Source : Oliva & Courgey, 2006)

Le zonage thermique ou le « principe de cloisonnement des espaces » permet de créer des zones de protection et génère des ambiances thermiques adéquates. La qualité des ambiances internes est influencée par l'organisation des espaces du bâtiment (halles, espaces d'attentes, loggias, vérandas, etc.) et leurs caractéristiques formelles et dimensionnelles.

4. Les facteurs de performance énergétique

Il existe cinq facteurs de performance énergétique comme le démontre la figure 5.11.

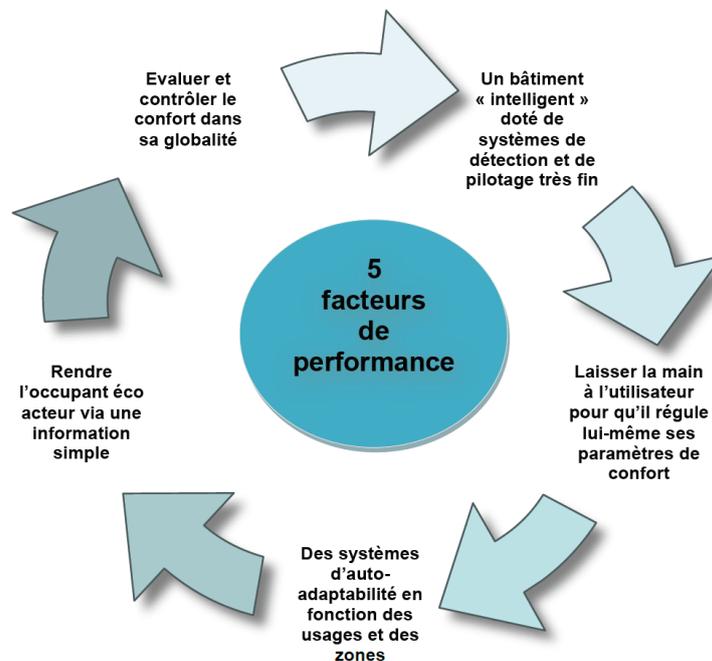


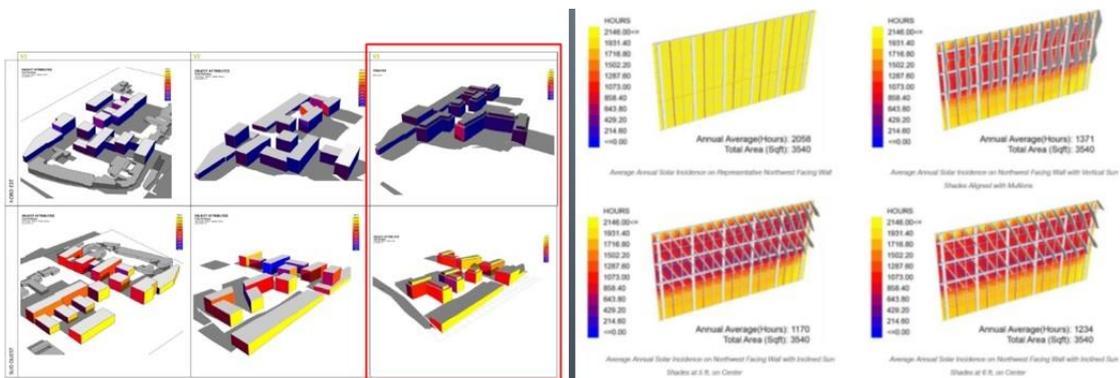
Figure 5.11 : Les facteurs de performance énergétique (Source : Morillon et al., 2011)

- Le premier facteur : est la conception des bâtiments intelligents.
- Le deuxième facteur : consiste à donner la liberté aux utilisateurs afin d'ajuster leurs paramètres de confort.
- Le troisième facteur : porte sur l'intégration des systèmes d'auto adaptabilité en fonction des usagers et des zones afin de donner l'aide à l'utilisateur et effectuer des adaptations s'il a omis une opération quelconque.
- Le quatrième facteur : est l'implication de l'occupant en tant que éco-acteur.
- Le dernier facteur : tente sur l'évaluation et le contrôle du confort dans sa totalité (thermique, visuel, acoustique, qualité d'air, etc.).

Conclusion

L'absence du confort thermique, génère des gestes de régulation thermique et oblige les occupants à l'exploitation des équipements électriques de chauffage et de climatisation. L'exploitation excessive des équipements influe négativement sur la performance énergétique du bâtiment et lui donne un aspect énergivore. Pour remédier à cette situation qui s'est érigée en problème mondial, il est primordial de faire des études numériques et expérimentales approfondies sur les composants des bâtiments pour tenter d'assurer le bien-être des utilisateurs et l'efficacité de la construction de manière passive. L'enveloppe compte parmi les composants du bâtiment les plus investis par les études sur l'efficacité énergétique et le plus prometteur pour relever le défi d'une architecture climatiquement intégrée et énergétiquement performante.

CHAPITRE VI : La modélisation et la simulation



CHAPITRE VI : La modélisation et la simulation

Introduction

Les programmes de la modélisation et de la simulation numérique sont considérés comme des outils puissants d'aide à la décision qui donnent aux utilisateurs (concepteurs, chercheurs, etc.) une lecture globale et une bonne compréhension du phénomène ou de l'élément étudié. Dans le secteur du bâtiment, les logiciels de simulation sont exploités pour étudier les différents phénomènes physiques relatifs aux bâtiments (thermique, acoustique, lumineux, aéraulique, ...) et leurs composants (façade, toiture, plancher, etc.). L'essor du champ de la simulation numérique avec un grand nombre des avantages rend la simulation numérique une étape incontournable dans toutes les conceptions.

1. La modélisation

La modélisation est une représentation virtuelle d'un phénomène ou d'un élément physique réel sous formats abstraits.

1.1. La modélisation en architecture

La modélisation en architecture est la représentation, la conception et la création d'un bâtiment en 3D sous format numérisé à travers l'utilisation des logiciels spécialisés.



Figure 6.1 : La modélisation avec le logiciel SketchUp (Source : www.sketchup.com)

1.2. Les logiciels de modélisation

Certains intervenants du projet vont être en charge de la création de modèles, c'est-à-dire qu'ils vont modéliser la géométrie de l'ouvrage et y lier des informations. Pour ce faire, il existe des logiciels de modélisation. Certains logiciels sont plus destinés à la modélisation architecturale, d'autres sont plus adaptés pour la modélisation des structures ou des techniques spéciales (Figure 6.2).

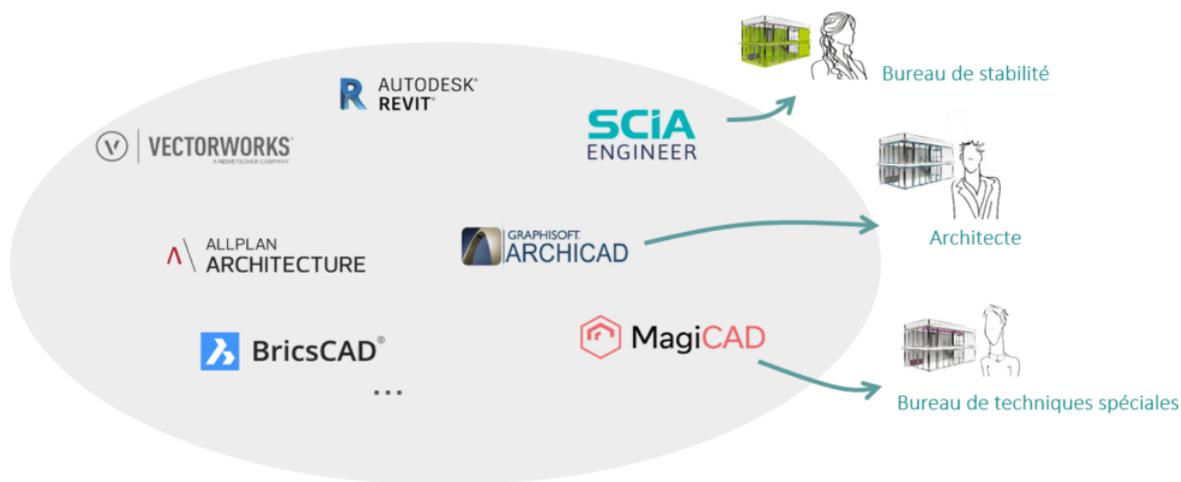


Figure 6.2 : Les logiciels de modélisation selon la tâche de l'acteur

(Source : www.biblus.accasoftware.com)

Il existe des logiciels gratuits et d'autres payants.

Il y a plusieurs logiciels de modélisation 3D destinés à l'architecture, on cite : ArchiCAD, AutoCAD, Revit, SketchUp, Edificius, AllPlan, 3D Studio Max, Rhinoceros et Grasshopper, etc.

2. La simulation

La simulation est une action qui consiste à faire un test avec un modèle numérique. Elle représente le processus qui permet de calculer et de reproduire sur ordinateur une réalité (comportement) physique sur la base des modèles numériques. Cette technique repose sur l'utilisation d'algorithmes décrivant le comportement des éléments et des phénomènes (solide, liquide et gaz) vis-à-vis des lois de la physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même une vidéo (Figure 6.3).

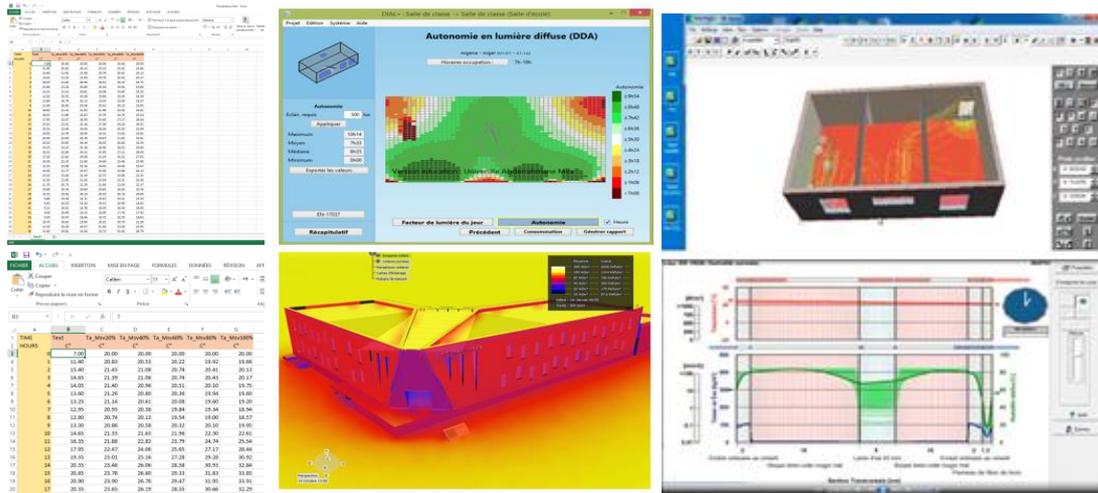


Figure 6.3 : Exemples des résultats obtenus à l'issue de la simulation

(Source : Auteur, 2020)

La simulation constitue un outil performant qui combine entre la précision du calcul, la variabilité dans les conditions de mesures et la possibilité d'effectuer des études paramétriques ciblées en isolant l'influence de chaque élément (Simuler = Comprendre → Optimiser).

2.1. Les logiciels de simulation

Aujourd'hui, les logiciels de simulation sont considérés comme des outils très puissants indispensables pour l'évaluation et l'optimisation des choix conceptuels dès la phase de l'esquisse. Il existe des logiciels permettant de réaliser des calculs, des simulations et analyses (acoustiques, thermiques, de l'éclairage, de l'ensoleillement, de durabilité (BREEAM), ...), on cite : Ecotect, Radiance, DIAL+, Trnsys, EnergyPlus, DesignBuilder, PHOENICS, ArchiWIZARD, etc.



Figure 6.4 : Exemple des logiciels de simulation (Source : www.biblus.accasoftware.com)

Il y a des logiciels de simulation gratuits et d'autres payants.

La figure suivante illustre un exemple d'une Simulation Thermique Dynamique « STD » du comportement thermique et la consommation énergétique d'un bâtiment élaborée par le logiciel ArchiWIZARD.

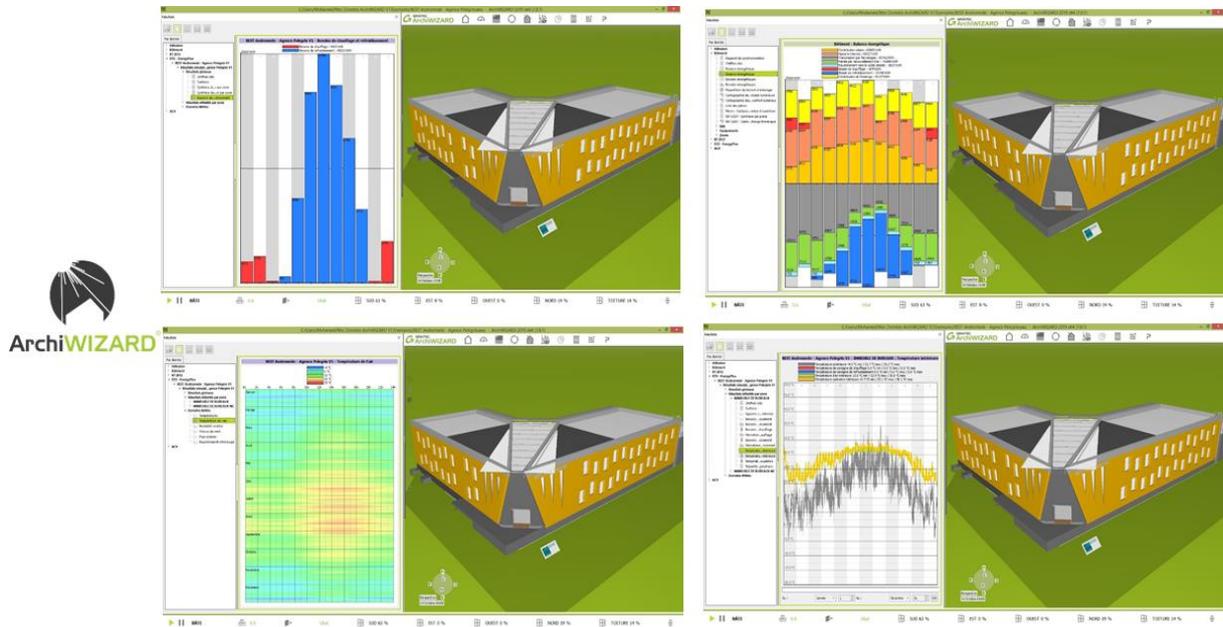


Figure 6.5 : Simulation thermique et énergétique d'un bâtiment par ArchiWIZARD
(Source : Auteur, 2020)

La figure 6.6 présente une simulation de l'éclairage naturel élaborée par le logiciel DIAL+.

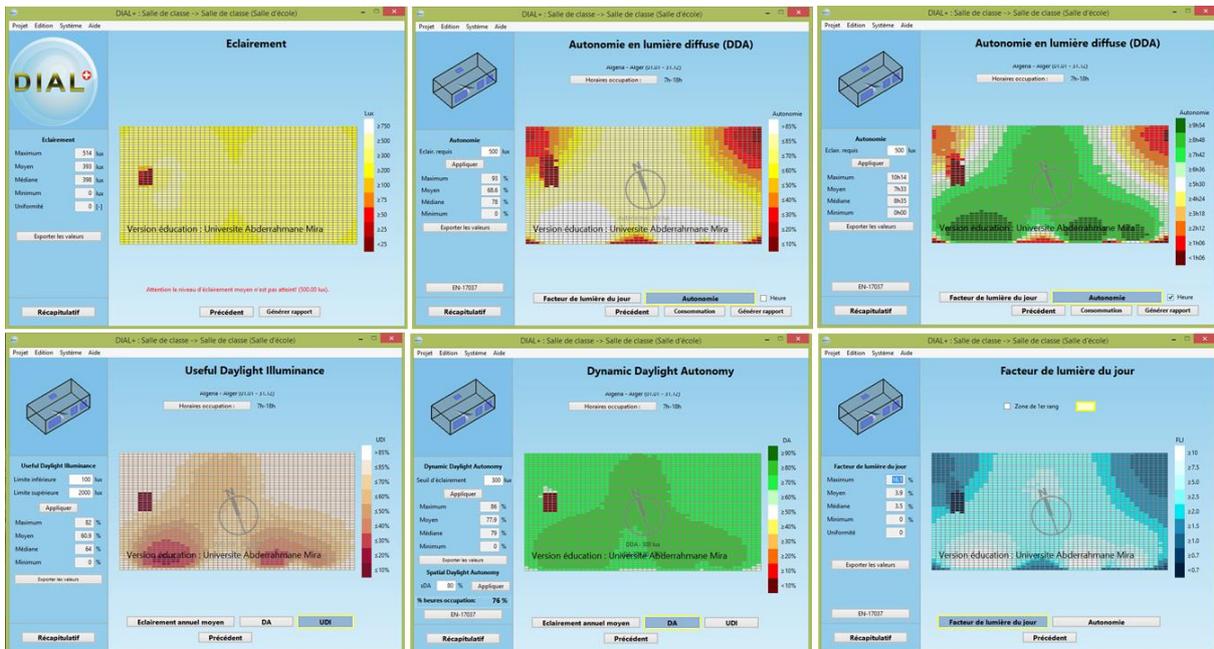


Figure 6.6 : Simulation de l'éclairage naturel par DIAL+ (Source : Auteur, 2020)

2.2. Les étapes de développement d'un modèle de simulation

Les étapes à suivre afin de développer un modèle de simulation sont :

- L'identification du problème et l'objectif de la simulation.
- La simulation est-elle appropriée à la résolution du problème ?
- La formulation du problème.
- La collecte et entrée des données (Inlet).
- La formulation du modèle.
- La validation.
- La conception et la détermination des essais.
- La simulation.
- Les résultats (Outlet).
- L'analyse des résultats de la simulation (interprétation des résultats).

2.3. Les échelles de la simulation en architecture

Il y a deux échelles :

- L'échelle urbaine.
- L'échelle architecturale.

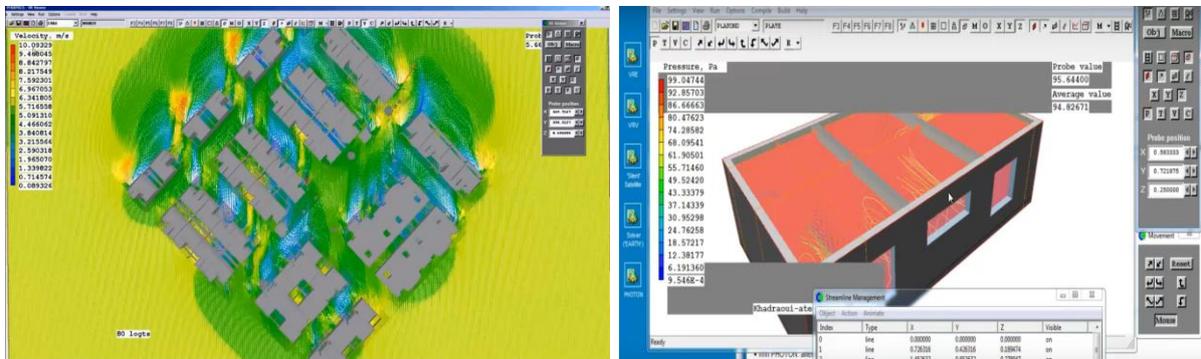


Figure 6.7 : Les échelles de la simulation (Source : Auteur, 2016)

L'échelle urbaine au niveau du quartier (simulation de la vitesse de l'air) et l'échelle architecturale au niveau du bâtiment (simulation de la vitesse de l'air et l'écoulement aérodynamique d'un espace).

3. Le BIM

Le BIM est l'acronyme de Building Information Modeling qui se traduit en Français par Modélisation des Informations (ou données) du Bâtiment. Le BIM est souvent assimilé à un logiciel ou à une technologie mais il est bien plus que cela. Il convient de préciser que le BIM

est une méthode de travail et non pas un outil de modélisation ou de simulation. Faire du BIM c'est davantage l'utilisation d'une bonne méthode de travail que l'utilisation des nouvelles technologies ou nouveaux logiciels. La figure suivante illustre la maquette numérique du BIM et les différentes phases de construction.

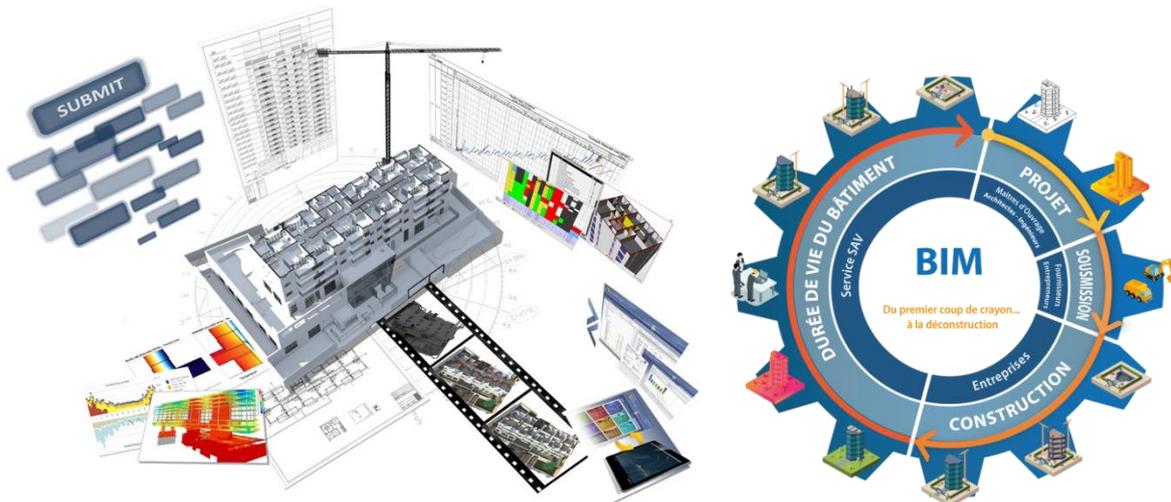


Figure 6.8 : La maquette numérique du BIM (Source : www.ndbim.com)

Le BIM est une méthode de travail collaboratif par l'utilisation d'une seule maquette numérique pour la création, la gestion et le partage des informations du projet de construction tout au long de son cycle de vie (programmation, conception, construction, utilisation, maintenance, etc.). Le BIM définit qui fait quoi, comment et à quel moment.

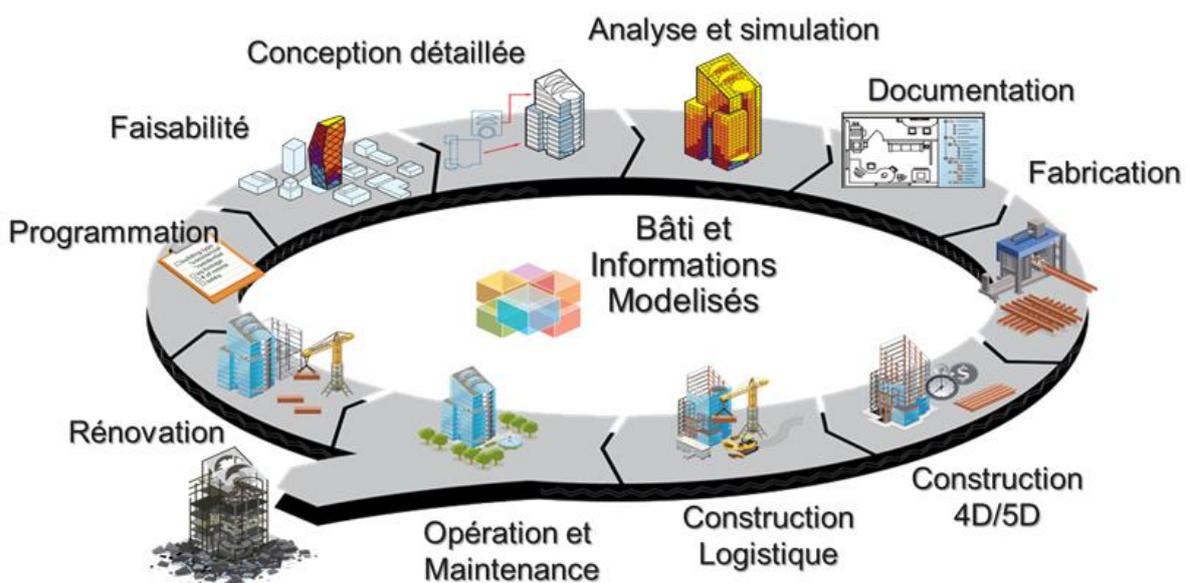


Figure 6.9 : Le cycle de vie du bâtiment dans le processus BIM
(Source : www.objectif-bim.com)

A travers l'exploitation d'un seul modèle virtuel 3D paramétrique intelligent tout au long de la conception, de la construction et l'utilisation du bâtiment. Ce modèle virtuel permet d'effectuer des visualisations, des analyses, des simulations (énergétiques, calcul structurel, détections des conflits, etc) et des contrôles (respect des normes, du budget, etc.).

Le BIM est une affaire de dialogue entre différents acteurs. Pour dialoguer, il faut parler le même langage. Avec le BIM, l'ensemble des acteurs utilisent le même langage " IFC : Industry Foundation Classes" quel que soit le logiciel utilisé (modélisation, calcul, simulation, etc.).

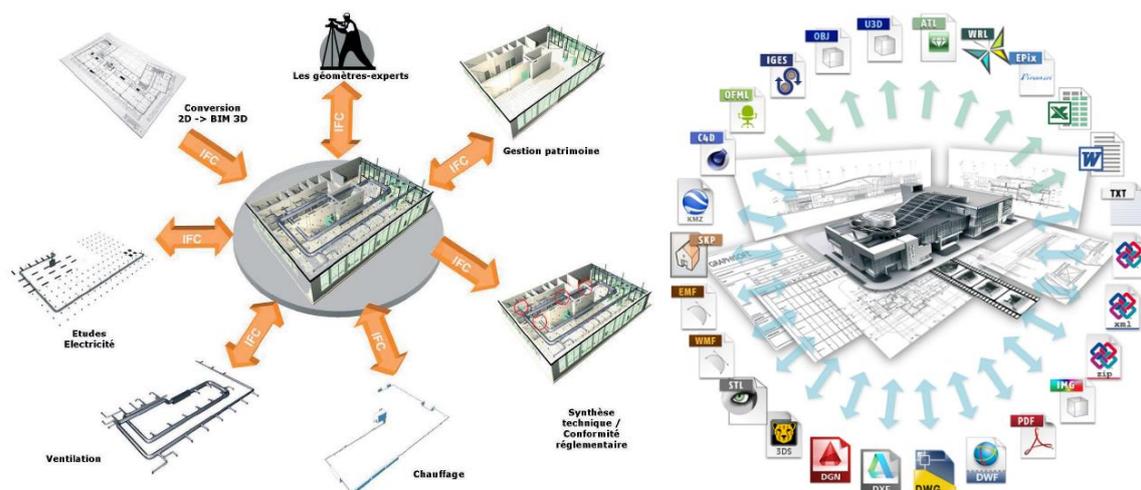


Figure 6.10 : L'interopérabilité entre les logiciels BIM (Source : www.pining.com)

Le format IFC permet de décrire des objets (murs, fenêtres, poteaux, poutres,...), leurs caractéristiques et leurs relations.

Grâce à cette maquette, il est possible d'évaluer les choix de conception, d'expérimenter de nouvelles formes, de lumières, de nouveaux matériaux, objets, etc. et de vérifier instantanément (en temps réel) chaque modification ou décision et ses impacts sur les différents plans (esthétique, économique, temporel, environnemental, etc.).

4. La simulation par ArchiWIZARD

L'essor du champ de la simulation numérique avec un grand nombre d'avantages rend la simulation numérique une étape incontournable dans toutes les conceptions quelles que soient les conditions.

4.1. Présentation du logiciel ArchiWIZARD

ArchiWIZARD est un logiciel de simulation énergétique des bâtiments qui permet de simuler et de démontrer la performance énergétique d'un projet architectural dès les premières

esquisses et tout au long de sa conception ou dans le cadre de sa rénovation, dans un environnement 3D en connexion directe avec la maquette numérique et les principales solutions CAO.

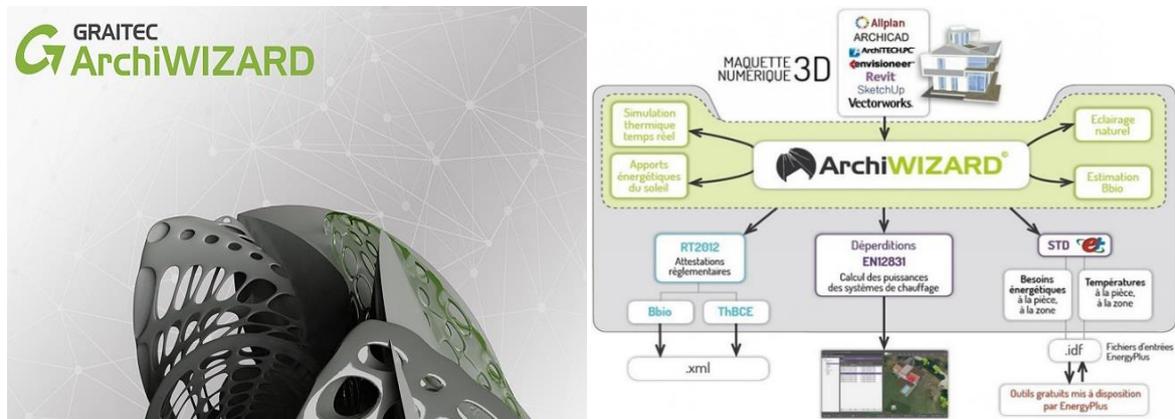


Figure 6.11 : Le logiciel ArchiWIZARD (Source : www.graitec.com/archiwizard)

Ce logiciel donne la possibilité d'évaluer l'aspect thermique, visuel et énergétique du bâtiment.

4.2. Méthodes de calcul

La figure suivante illustre une vue d'ensemble des références normatives utilisées par le logiciel ArchiWIZARD pour le calcul.

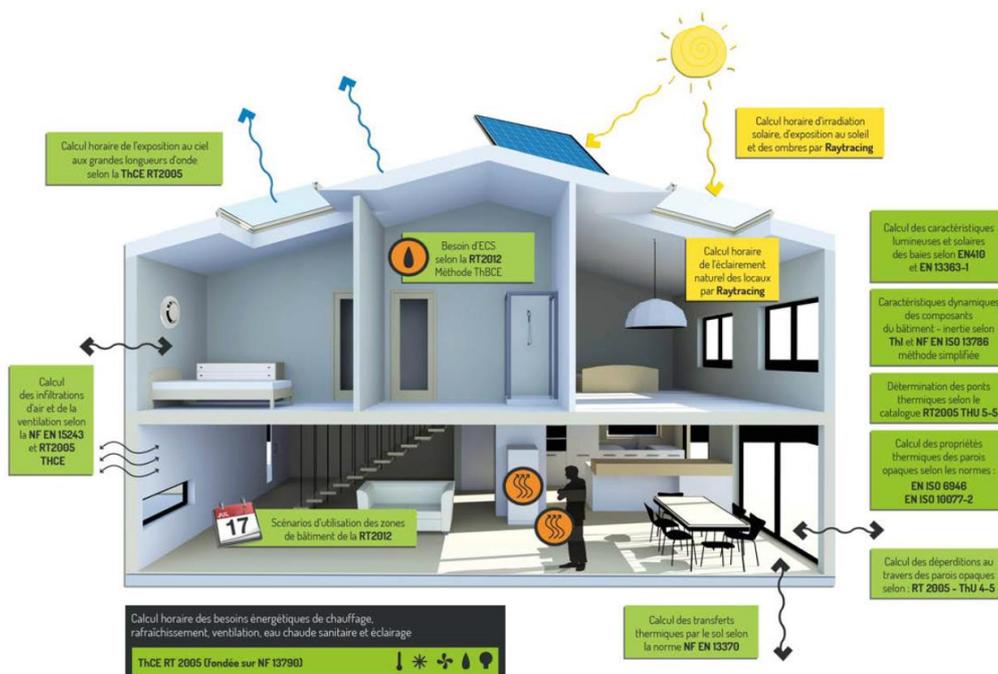


Figure 6.12 : Les références normatives utilisées par ArchiWIZARD pour le calcul (Source : www.graitec.com/archiwizard)

Le format du fichier climatique utilisé par ce logiciel est « epw ».

4.3. Les étapes de développement d'une simulation par ArchiWIZARD

Après l'installation du logiciel (version "éducation"), suivez les étapes suivantes :

- Modéliser votre projet sous 'ArchiCAD' ou 'SketchUp' (minimum trois espaces avec les portes, les fenêtres, les cloisons, etc.) avec l'environnement extérieur (obstacles, arbres, bâtiments, ...);
- Enregistrer le modèle sous format (skp ou obj);
- Dans ArchiWIZARD, importer le modèle 3D du projet (skp ou obj) avec l'insertion du fichier climatique de la ville en question sous format (epw);
- Veiller à définir la date de construction (avant ou après 2012) et l'usage du bâtiment (bureau, commerce, hôpital, hôtel, maison, université, etc.);
- Suivez les étapes relatives à la détermination des éléments du modèle 3D et les caractéristiques (parois, vitrage, cadre, environnement et objets);
- Définir l'échelle de la scène par rapport à l'être humain;
- Suivez les étapes concernant l'insertion des données relatives à l'environnement (sol, objets extérieurs, ...) et au bâtiment (orientation, définition des zones, matériaux, baies, etc.);
- Visualiser en temps réel l'imagerie solaire et les ombres portées;
- Créer une carte d'éclairage (éclairage, FLJ);
- Créer une simulation thermique dynamique (STD) avec EnergyPlus;
- Elaborer et exporter le rapport de simulation sous format PDF.

Après la lecture de ces résultats, faites une interprétation sur l'aspect en question.

Conclusion

Les programmes de la modélisation et de la simulation numérique sont considérés comme des outils puissants d'aide à la décision qui donnent aux concepteurs une lecture globale et une bonne compréhension du phénomène ou de l'élément étudié. Dans le secteur du bâtiment, les logiciels de simulation sont exploités pour étudier les différents phénomènes physiques (température, humidité, éclairage, vitesse de l'air, etc.) et énergétiques relatifs aux bâtiments et leurs composants. Ils permettent également d'optimiser la conception d'un bâtiment en proposant une approche réaliste du fonctionnement de la construction à l'aide de calculs détaillés. Ils donnent ainsi la possibilité d'apprécier les phénomènes physiques qui s'opèrent dans le bâtiment et de les étudier durant toute l'année avec un grand degré de précision.

Cette technique est très utile vu les atouts approuvés sur plusieurs plans ainsi que la précision et la fiabilité des résultats obtenus.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le confort est une notion très importante dans le domaine du bâtiment, il représente un grand champ de recherche vu son caractère subjectif compliqué et son influence sur les différentes dimensions physiologique, comportementale et psychologique de l'individu. La pratique architecturale inappropriée au contexte climatique et aux spécificités de l'environnement immédiat engendre des ambiances inconfortables. L'absence du confort génère des gestes de régulation et oblige les occupants à l'exploitation des moyens mécaniques (chauffage, climatisation, éclairage artificiel, etc.) ce qui engendre des constructions énergivores par l'augmentation de la consommation énergétique qui dépend d'une exploitation irrationnelle des ressources non renouvelables et de la dégradation irréversible de la nature. La correction de l'écart conceptuel existant entre les besoins des usagers, la conception des bâtiments et le contexte climatique nécessite l'étude et l'évaluation des choix et des alternatives afin de mieux répondre aux différentes exigences et résoudre les problèmes qui pourraient se poser ultérieurement.

L'architecte en tant que premier responsable de l'œuvre architecturale, doit assumer les impacts de ses décisions conceptuelles et ses choix matériels non seulement sur l'aspect esthétique mais également en ce qui est des ambiances, du confort, des dépenses énergétiques de la construction et des impacts sur l'environnement. Une nécessité sine qua non s'impose à tout concepteur pour comprendre l'ensemble des phénomènes et des aspects liés au bâtiment pour faire des évaluations afin de prendre des décisions correctes et appropriées. Les études d'évaluation du confort dans les constructions et de la performance de ces derniers sont basées sur des méthodes analytiques, empiriques sur terrain, expérimentales et numériques selon l'élément étudié et les objectifs de l'étude. Néanmoins, la variété des contextes et les conditions climatiques nécessitent d'effectuer des études approfondies pour chaque région afin de trouver des solutions adéquates et bien adaptées qui assurent le confort des usagers et la performance du bâtiment sur tous les plans. Cette évaluation aidera les architectes à opter pour les choix conceptuels et matériels les plus adaptés afin d'assurer le confort des usagers, diminuer et rationaliser les besoins énergétiques et préserver l'environnement.

Bibliographie

APRUE, Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (2019). Consommation énergétique finale de l'Algérie, chiffres clés Année 2017. Algérie : Ministère de l'Energie et des Mines.

Alwetaishi, M., Alzaed, A., Sonetti, G., Shrahily, R., Jalil, L. (2017). Microclimate investigation in school buildings using advanced energy equipment: Case study. *Environmental Engineering Research*, 23 (1), 10-20.

Arexis, L. (2014). *Etude et optimisation d'un système d'éclairage efficace énergétiquement et adapté aux besoins de ses utilisateurs 'santé, sécurité et qualité de vie'* (Thèse de Doctorat). Université de Toulouse, France.

Audiffret, P., Levan, S.K. (2018). *Les managers du BIM: guide impertinent et constructif*. France: Eyrolles.

Auffret, M. (2015). Les notions essentielles de l'acoustique. Conférence-débat organisée par la FIPS et le CIDB.

Batier, C. (2016). *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen « D'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales »* (Thèse de Doctorat). École nationale supérieure d'architecture de Montpellier, France.

Belkacem, N. (2017). *Contribution à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales d'un habitat individuel bioclimatique : cas de la maison pilote de Souidania-Alger* (Thèse de Doctorat). Université de Chlef, Algérie.

Bonte, M. (2014). *Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment « Modélisation par intelligence artificielle et mesures in situ »* (Thèse de Doctorat). Université de Toulouse, France.

Bodart, M., Deneyer, A. (2017). Principes de base de l'éclairage naturel et du confort visuel. UCL et CSTB, France.

Boudreau, J.P. (2011). L'optimisation énergétique: un travail sur l'enveloppe. Communication présentée au colloque CEBQ/OAQ sur l'enveloppe du bâtiment, Québec, Canada.

Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E., Cotana F. (2013). Unsteady simulation of energy performance and thermal comfort in non-residential buildings. *Building and Environment*, 59, 482-491.

Cablé, A. (2013). *Étude expérimentale et numérique du traitement des ambiances par le vecteur air dans les bâtiments à très basse consommation d'énergie* (Thèse de Doctorat). Université de La Rochelle, France.

Chesné, L. (2012). *Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques* (Thèse de Doctorat). L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

Cloud, C. (2015). Acoustique du bâtiment et de l'environnement. www.general-acoustics.fr

Dossier thématique (Ambiances lumineuses & confort visuel) (2016). Rapport élaboré par: Réseau Breton Bâtiment Durable.

Dorin, B. (2013) Light and health [Online] http://ip2013.eap.gr/pdf/RO_Beu_part2-2.

Duboz, R., Garcia, F., Quesnel, G., Ramat, E. (2008). *Théorie de la Modélisation et de la Simulation*. Laboratoire d'Informatique du Littoral.

Duran, S.C. (2011). *Architecture et énergie, un enjeu pour l'avenir*. France : Place Des Victoires.

Dugué, A. (2013). *Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations* (Thèse de Doctorat). Université de BORDEAUX 1, France.

El-Darwish, I., Gomaa, M. (2017). Retrofitting strategy for building envelopes to achieve energy efficiency. *Alexandria Engineering Journal*, 56 (4), 579-589.

Faure, D. (2006). *Confort visuel*. Centre de Ressources EnviroBat.

Fernandez, P., Lavigne, P. (2009). *Concevoir des bâtiments bioclimatiques: fondements et méthodes*. France: Le Moniteur.

- Fernández-González, A. (2007).** Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced by five different passive solar heating strategies in the United States midwest. *Solar Energy*, 81(5), 581-593.
- Floru, R. (1996).** Eclairage et vision. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 149, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS).
- Gallo, C., Sala, M., Sayigh, A.A.M. (1998).** *Architecture: comfort and energy* (1ère éd., Vol.2). Royaume-Uni : Elsevier.
- Gladieux, C. (2018).** *Simulation numérique : du produit à l'usine complète*. Cad Magazine. Repéré à www.annuairedu4-0.fr/cad-magazine/1-du-produit-a-lusine-complete
- Ghosh, A., Norton, B., Duffy, A. (2016).** Behaviour of a SPD switchable glazing in an outdoor test cell with Heat Removal under varying weather conditions. *Applied Energy*, 180, 695-706.
- Gratia, E., De Herde, A. (2006).** *Thermique des immeubles de bureaux* (1ère éd.). Belgique : Presses universitaires de Louvain.
- Guillaume, D. (2016).** *La simulation numérique: Enjeux et bonnes pratiques pour l'industrie*. France : Dunod.
- Hall, M.R. (2010).** *Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings* (1ère éd.). New Delhi : Woodhead Publishing.
- Heiselberg, P. (2009).** *Expert Guide – Part 1 Responsive Building Concepts*. Danemark: Université d'Aalborg.
- Ibrahim, M. (2014).** Improving the building envelopes energy performance using aerogel-based insulating mineral rendering (Thèse de Doctorat). Université Paris Tech, France.
- Jedidi, M., Benjeddou, O. (2016).** *La thermique du bâtiment du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation* (1^{ère} éd.). Paris: Dunod.
- Karanouh, A., Kerber, E. (2015).** Innovations in dynamic architecture: The Al-Bahr Towers Design and delivery of complex facades. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3 (2), 185-221.
- Kjell, A. (2014).** *Design Energy Simulation for Architects Guide to 3D graphics* (1ère éd.). New York : Routledge.

Kirschbaum, N.S. (2016). *The effectiveness of fixed solar shading*. Communication présentée au séminaire international Façade tectonics - World Congress Los Angeles, États-Unis.

Lavoye, F., Boeuf, F., Thellier, F. (2015). *Qualité des ambiances dans les bâtiments* (1ère éd.). Paris : Presses des MINES-collection Développement durable.

Liébard, A., De Herde, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* (1ère éd.). Paris : Observ'ER.

Lirola, J.M., Castañeda, E., Lauret, B., Khayet, M. (2017). A review on experimental research using scale models for buildings: Application and methodologies. *Energy and Buildings*, 142, 72-110.

Matthieu, M. (2016). Confort acoustique des bâtiments (les grandes notions). Cerema.

Mazari, M. (2012). *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : Cas du département d'architecture de Tamda « Tizi-Ouzou »* (Mémoire de Magister). Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie.

Miquey, D. (2010). La prise en compte de l'énergie et du climat dans l'urbanisme, l'approche bioclimatique dans l'aménagement. Repéré à www.territoires-durables.fr/IMG/pdf/rt_climat_090410_bioclim_inddigo.pdf

Mishra, A.K., Loomans, M.G.L.C., Hensen, J.L.M. (2016). Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions-An overview. *Building and Environment*, 109, 82-100.

Misse, A. (2011). *Stratégie du chaud/stratégie du froid, les grands principes*. Note du cours, École nationale supérieure d'architecture de Grenoble, France.

Moujalled, B. (2007). *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés* (Thèse de Doctorat). L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

Morillon, F., Hernandez, M.A.B., Minet, A, Demazure, O., Gall, H.B.C., Aillerie, Y., Rozmiarek, F. (2011). *Livre blanc : Confort et Santé dans les immeubles de bureaux énergétiquement performants- Approche globale et Interactions entre confort et performance énergétique* (1ère éd.). États-Unis, Steelcase.

Oliva, J.P., Courgey, S. (2006). *La conception bioclimatique des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation.* France : Terre Vivante.

Omrany, H., Marsono, A.K. (2016). Optimization of Building Energy Performance through Passive Design Strategies. *British Journal of Applied Science and Technology* 13 (6), 1-16.

Prieto, A., Knaack, U., Klein, T., Auer, T. (2017). 25 Years of cooling research in office buildings: Review for the integration of cooling strategies into the building façade (1990–2014). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 89-102.

Roulet, A. (2004). *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments* (1ère éd.). Suisse : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes de Lausanne.

Robillart, M. (2015). *Étude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants* (Thèse de Doctorat). École nationale supérieure des mines de Paris, France.

Saad, M. (2014). *Modélisation et simulation numérique.* Ecole Centrale de Nantes.

Sozer, H. (2010). Improving energy efficiency through the design of the building envelope. *Building and Environment*, 45 (12), 2581-2593.

Van-Damme, M. (2017). Acoustique du Bâtiment. Guide bâtiment durable. bruxellesenvironnement.be

Varenne, F., Silberstein, M., Dutreuil, S., Huneman, P. (2014). *Modéliser et simuler : Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation.* France : Editions Matériologiques.

Velázquez-Romo, E.E. (2015). *Processus de conception énergétique de bâtiments durables* (Thèse de Doctorat). Université d'Arts et Métiers ParisTech, France.

Wannous, S. (2013). *Les économies d'énergie provoquées par la crise pétrolière de 1974 dans les bâtiments publics franciliens* (Thèse de Doctorat). Conservatoire national des arts et métiers cnam, France.

Weissenstein, C. (2012). *Éco-profil : un out il d'assistance à l'éco-concept ion architecturale* (Thèse de Doctorat). Université de Lorraine, France.

Zemella, G., Faraguna, A. (2014). *Evolutionary Optimisation of Facade Design A New Approach for the Design of Building Envelopes* (1ère éd.). London : Springer.

Sites internet

www.energieplus-lesite.be

www.uclouvain.be

www.saint-gobain.com/fr

www.sdeurope.org

www.pae-engineers.com

www.comfort.cbe.berkeley.edu

www.asstsas.qc.ca

www.habitsaclasse.be

www.universalis.fr

www.acousticlab.com

www.alec-nancy.fr

www.spectra.fr

www.objectif-bim.com

www.bimbt.com

www.futura-sciences.com