

**C**

**HAPITRE 2**

# 2

## MÉTHODES D'ÉVALUATION ET DE DIAGNOSTIC

---

### I NTRODUCTION

Assurer le confort dans le bâtiment est l'une des préoccupations primordiales des architectes et des ingénieurs. Pour cela, plusieurs méthodes, démarches et outils ont vu le jour dans le but d'optimiser, d'analyser et d'évaluer les paramètres physiques à l'intérieur d'un environnement construit. L'objectif principal de ces méthodes est de garantir le bien être des usagers dans tous les saisons, réduire la consommation énergétique des bâtiments ce qui conduit par conséquent à la préservation de notre planète. La première partie de ce présent chapitre donne un aperçu sur la notion du développement durable, ces enjeux et les concepts des bâtiments performants. Dans la deuxième partie, les différentes méthodes d'évaluation et de diagnostic du confort dans le bâtiment seront présentées en détail.

## 2.1.

# LE DÉVELOPPEMENT DURABLE ET LA QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE

---

## INTRODUCTION

**L**a demande d'un environnement durable et en particulier l'architecture durable est omniprésente. La véritable consommation d'énergies fossiles conduit à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, le méthane, etc... et par conséquent, le réchauffement de la terre. Ces dangers encourus par notre planète et ses habitants rendent indispensable une remise en question de nos modes de vie. Elle passe entre autres par le développement durable et la nécessité d'une architecture écologique ou éco-responsable : Confortable, Fonctionnelle, Econome en matières premières et Respectueuse de l'environnement.

### 2.1.1. Les enjeux du développement durable et de la qualité environnementale

- Changements climatiques : émission de gaz à effet de serre, turbulences climatiques
- Santé humaine et biodiversité : pollutions générées, risques sanitaires, diversité faune et flore
- Épuisement des ressources : territoires, forêts, énergie primaire, eaux, matériaux, air
- Déséquilibre sociaux : explosion démographique, accès aux énergies et à l'eau, risques technologiques
- Évolution du marché du bâtiment : rénovation des bâtiments, apparition de nouvelles sociétés, franchise commerciale, franchise courtier travaux, entreprises étrangères.
- Transformation culturelles : participer à la protection de la planète et maîtriser ses décisions en ce qui concerne le choix des matériaux, les méthodes adopter, les technologies utilisées, ...etc.

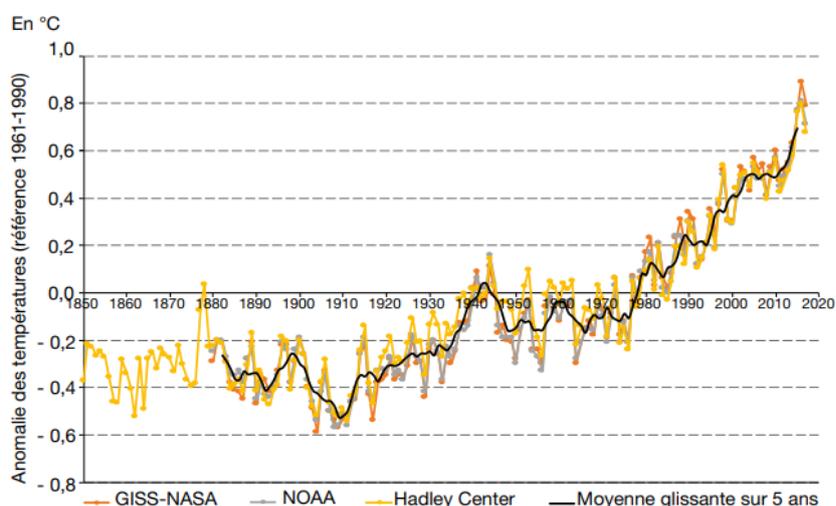


Figure 17. Evolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2017  
(source : NASA, NOAA, Hadley Center)

### 2.1.2. Evolutions techniques et réglementaires

Evolutions techniques et réglementaires a vu le jour par les nouveaux principes de précaution, de pression médiatique, la maîtrise de la provenance et l'origine des matériaux utilisés, ainsi que les conditions de travail, qualité air intérieure, les nouvelles sources d'énergie et par la créativité industrielle. Aujourd'hui, la qualité environnementale et l'efficacité énergétique occupent une place de plus en plus importante dans les domaines de bâtiment, que ce soit en construction neuves ou en rénovation. De fait, depuis les années 1980, des labels, des normes, des certifications, des démarches, des référentiels foisonnent au niveau national, européen et mondial. Le contexte énergétique et environnemental de début de 21ème siècle est marqué par la question de la pérennité au niveau de ressources minérales et énergétiques, Cadre de vie, Santé et Biodiversité.

### 2.1.2.1. Sur le plan énergétique

Le déséquilibre entre une production énergétique fondée sur des ressources minérales limitées issues de l'écorce terrestre et une consommation en forte croissance favorise les tensions de tous ordres (économique, géographique, social etc.).

### 2.1.2.2. Sur le plan environnemental

Les activités humaines exploitent les ressources procurées par la biosphère terrestre et rejettent les résidus de leurs productions sous forme de déchets dans cette même biosphère. Le fort accroissement de ces activités induit, à plus ou moins long terme, des impacts conséquents, à toutes les échelles (locale, régionale, globale).

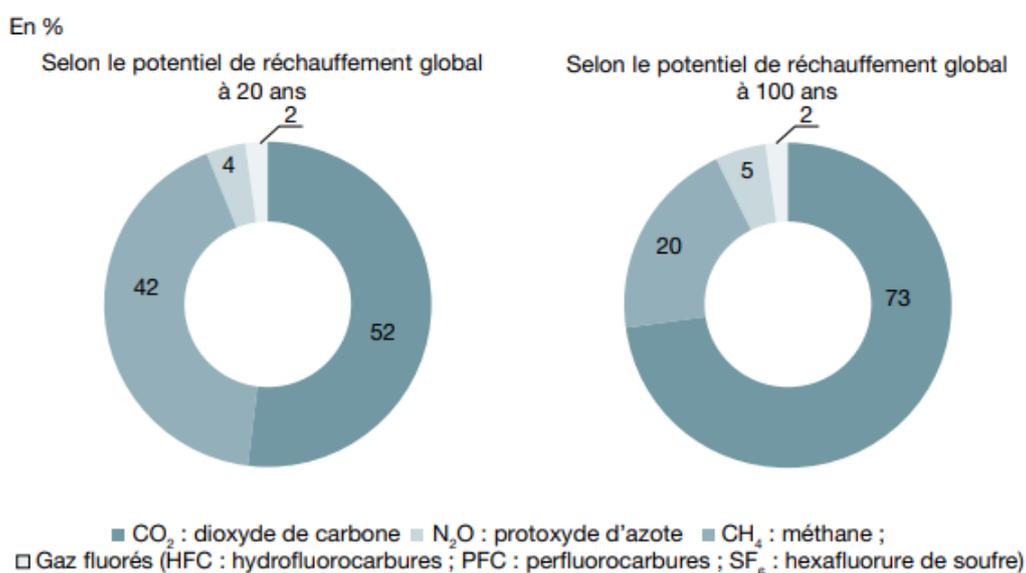


Figure 18. Répartition des émissions mondiales de GES (y compris UTCATF) par gaz en 2010  
 (D'après Giec, 3<sup>e</sup> groupe de travail, 2014)

Suite au sommet de la Terre à Rio en 1992, le protocole de Kyoto en 1997 a fixé au niveau international des objectifs de réduction des émissions de GES ainsi qu'un calendrier à un niveau international, et la directive européenne (Efficacité énergétique) en 2002.

- La France s'est ensuite engagé dans la lutte contre les émissions de GES et a multiplié les initiatives (Facteur 4 et POPE).
- En 2004 a été lancé le Plan climat et son objectif dit Facteur 4 : diviser par 4 les émissions de GES d'ici 2050 en France.
- En 2005, la loi POPE (Programme des Orientations de la Politique Énergétique) définissait les grands axes de la politique énergétique jusqu'au 2020, avec pour objectif global de réduire de 30% les consommations d'énergie et les émissions de GES.

### **2.1.3. Le grenelle de l'environnement**

L'objectif affiché du grenelle de l'environnement est vaste : Les propositions ont été élaborées au sein de six groupes de travail ayant chacun des objectifs précis :

- Lutter contre les changements climatiques : moderniser le bâtiment et la ville, efficacité énergie et carbone, urbanisme et gouvernance territoriale et mobilité de transport.
- Préserver la biodiversité et les ressources naturelles.
- Instaurer un environnement respectueux de la sante.
- Adopter des modes de production et de consommation durable.
- Promouvoir des modes de développement écologiques favorable à l'emploi et à la compétitivité.

Le grenelle de l'environnement a instauré un programme de rupture dans le neuf : le niveau bâtiment basse consommation BBC, correspond à des bâtiments consommant moins de 50kwh/m<sup>2</sup>, an, doit s'appliquer à toutes les constructions neuves à compter de la fin 2012, par anticipation, à toutes les constructions de bâtiments publics et tertiaires à partir de fin 2010. L'objectif est de construire, à partir de 2020 des bâtiments à énergie positive BEPOS.

### **2.1.4. Enjeux des certifications et labels**

L'obtention d'une certification ou d'un label est une démarche volontaire engagée par un maître d'ouvrage ou d'un promoteur qui souhaitent faire contrôler et reconnaître la qualité de ses constructions ou réhabilitation : ces différents labels et certifications sont des indicateurs pour un futur acquéreur ou locataire, en termes de confort, d'économie de charges et de respect de l'environnement. Aujourd'hui, bon nombre de maître d'ouvrage et de promoteurs se sentent concernés par les enjeux environnementaux et énergétiques évoqués précédemment. Cette démarche permet également de faire valider les performances obtenues et répondre aux demandes des clients en donnant des preuves concrètes. Dans le cadre de la crise économique actuelle, les candidats à l'acquisition ou à la location (résidentiel ou en tertiaire) sont en quête de bâtiment de qualité et énergétiquement performant, ils recherchent à la fois des valeurs sûres et des économies de charges. Sensibilisés à la protection de la planète, ils se tournent également plus largement vers l'écoconstruction et l'éco-rénovation. Les maître d'ouvrage et promoteurs doivent se donner les moyens de répondre à ces attentes et de garantir à leurs clients la qualité environnementale et énergétique de leurs offres, en les faisant contrôler par un organisme ou une association qualifié et indépendant, qui en général possède un réseau national de vérificateurs.

La filière bâtiment est par conséquent particulièrement concernée par cette évolution à la fois éthique, réglementaire et économique

### **2.1.5. Les concepts de bâtiments performants**

Les concepts de bâtiments performants se trouvent le plus souvent définis dans le cadre de certifications, de labels ou de réglementations. Ils sont alors associés à un cahier des charges décrivant leurs objectifs ou à une méthode d'évaluation de leur niveau de performance. Leurs dénominations sont variées, chacune mettant l'accent sur une caractéristique majeure du bâtiment. Ces dénominations sont nécessairement réductrices. Une typologie des dénominations rencontrées dans la littérature a été réalisée, de manière à faire ressortir les principales caractéristiques de ces bâtiments et les principaux concepts associés. Deux types d'approches se distinguent : **Des approches purement énergétiques** et **Des approches plus larges**.

#### **2.1.5.1. Concepts purement énergétiques**

Les concepts purement énergétiques accompagnent des réglementations visant la performance énergétique des bâtiments :

- Réglementation Thermique 2005[JORF 2006] en France.
- En France, la réglementation propose cinq labels (HPE, THPE, HPE EnR, THPE EnRet BBC 2005).
- Des labels (Minergie en Suisse [Minergie 2008], Passivhausen Allemagne [Passivhaus 2008], Casa Clima/Klimahausen Italie [Klimahaus 2008]).
- Soit plusieurs niveaux de performance différents, et incite à l'intégration de sources d'énergies renouvelables au bâtiment [JORF 2007].

#### **2.1.5.2. Concepts plus larges**

Certains concepts découlent d'approches globales qui prennent en compte un grand nombre d'interactions du bâtiment avec son environnement, la question énergétique ne formant qu'une partie de ces interactions. C'est le cas des méthodes : CASBEE(Japon) [CASBEE 2008], LEED (États-Unis d'Amérique) [USGBC 2008], BREEAM(Royaume-Uni) [BREEAM 2008], la norme R-2000au Canada, qui est associée à une réglementation [R2000 2005]. En France, la démarche HQE (Haute Qualité Environnementale), proposée aux maîtres d'ouvrage, ne fixe aucun objectif de performances [AssoHQE 2006].

## 2.2

# LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DU CONFORT

---

## INTRODUCTION

Quel que soit l'environnement dans lequel il se trouve, l'Homme cherche toujours à assurer son bien-être. Pour cela, le bâtiment doit offrir les conditions intérieures les plus confortables pour les occupants. Des méthodes sont ainsi développées pour définir, interpréter et optimiser les ambiances intérieures (thermiques, acoustiques, visuelles et olfactives). Ces méthodes permettent de traduire les facteurs sensibles en termes d'indices de sensation. Elles peuvent être émises par méthodes de calcul empirique, des indices et des diagrammes, des enquêtes sur terrain et des expérimentations par des modèles physiques ou numériques.

## 2.2.1

## LES MESURES IN SITU

Les mesures sur site sont un outil facile et simple à exécuter et permet d'étudier qualitativement et quantitativement les paramètres physique de la lumière, de chaleur, du son... à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment.

### 2.2.1. Les mesures n situ

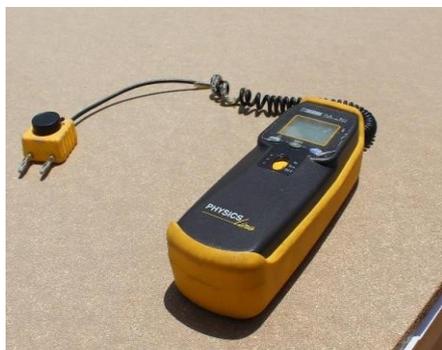
Elles permettent de caractériser l'ambiance intérieure et d'obtenir les vraies valeurs de température, de son, d'éclairement, de luminance, ... etc. Les mesures possibles sont nombreuses, on cite :

- Mesures relatives au bien-être des occupants (traitement des plaintes, questionnaire, mesure du confort thermique...etc.).
- Mesures relatives à l'aération (perméabilité de l'air de l'enveloppe du bâtiment, débit de l'air, qualité de l'air...etc.)
- Mesures acoustiques (niveau acoustique, temps de réverbération, isolation aux bruits aériens ou bruit d'impact...etc.)
- Mesures de l'éclairage (éclairage, luminance, éblouissement...etc.)
- Mesure de l'isolation thermique des composants des bâtiments, ...etc.
- Mesures de la consommation d'énergie (consommation, indice de dépense d'énergie, signature énergétique...etc.)

Pour que les mesures de diagnostic soient efficaces, il est important de définir avant tout les objectifs de cette étude et les informations à obtenir tout en veillant que les mesures apporteront toute l'information utile. Il est recommandé aussi de définir la méthode d'interprétation avant d'entamer d'expérimentation et effectuer les mesures.

Il est également important pour effectuer des mesures sur site, qu'on soit équipés des matériels adéquats tels que luxmètre (mesure de l'éclairage), luminance mètre (mesure de luminance),

Caméra thermique digitale (mesure de la température de surface) et un Thermomètre multifonctions pour la mesure de la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité relative (voir Figure 19).



Luxmètre



Luminance mètre



Caméra thermique digitale



Thermomètre multifonctions

*Figure 19. Matériels de mesure in situ (Auteur, 2019)*

Le choix de cet outil peut être compris entre deux limites.

- La première, c'est que ces mesures ne peuvent être réalisées qu'après la construction du bâtiment.
- La deuxième, qu'elles dépendent des conditions climatiques.

## 2.2.2

## LES METHODES DE CALCUL

---

**L**es méthodes de calcul simplifiées sont des outils qui permettent la prédétermination de la lumière naturelle. Ces outils se présentent sous forme d'algorithmes simplifiés, de tables, de nomogrammes, de diagrammes, ... et sous forme informatique ou sous format papier. Ces méthodes sont utilisées pour le calcul de l'éclairage, de facteur de lumière de jour, de chaleur, de déperdition thermique, du niveau sonore, de charge de climatisation, consommation énergétique...etc...

### 2.2.2.1. Méthodes de calcul empirique de l'éclairage

La commission internationale de l'éclairage a développé à l'aide des formules et des abaques une méthode pour pouvoir estimer le FLJ à l'intérieur d'un local sous des conditions de ciel couvert. Ces méthodes sont généralement utilisées par les concepteurs dans la première phase d'esquisse d'un projet d'éclairage car elles donnent des valeurs approximatives d'éclairage dans un local, ce qui permet d'avoir une première idée sur l'éclairage de cet espace. Elles trouvent leurs limites dès que se présentent des besoins de visualisation de l'ambiance intérieure et d'analyse du confort visuel ainsi que dans des situations d'éclairage complexes. Ceci qui nous oblige de recourir à d'autres outils de prédétermination. Différentes méthodes simplifiées permettent de calculer l'éclairage intérieur en fonction de l'installation d'éclairage et de la lumière naturelle. Citons entre autres :

-La méthode des diagrammes de Waldram (voir Figure 20). Cette méthode est basée sur un système de projection du ciel sur une grille dont chaque élément représente une contribution (équivalente) du ciel pour l'éclairage du point considéré. Il existe plusieurs diagrammes pour divers types de ciels, permettant des calculs pour différentes conditions extérieures.

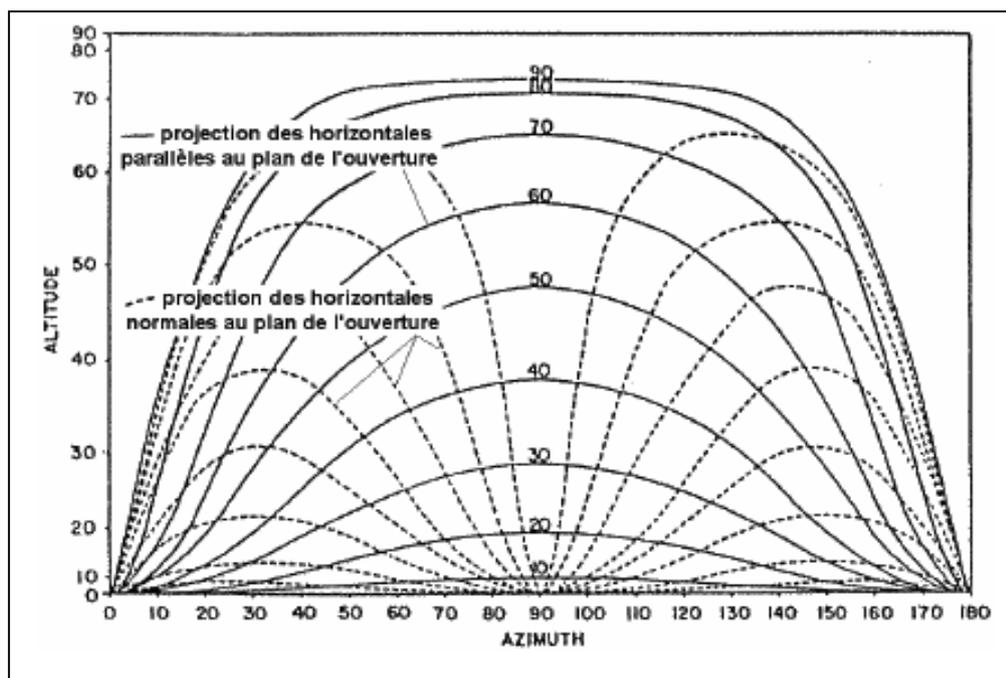


Figure 20. Diagramme de Waldram (Source : Francis Miguet, 2000)

-La méthode BRS. Elle est mise au point par le BRE (Building Research establishment-United Kingdom). C'est une méthode qui permet de calculer les valeurs de FLJ pour un ciel couvert en un point d'un local sur base de ses plans et du type du ciel. Ces méthodes relativement simples à appliquées prend en compte les obstructions extérieurs. Elle se repose sur l'emploi de disques qui, appliqués à la bonne échelle sur les vues en coupe des bâtiments, permettent de déterminer la composante directe de l'éclairage naturel. Différents disques offrent la possibilité de calculer les éclairagements naturels sous divers types de ciels.

-La norme NBN L 13-002 pour les calculs liés à la présence de la lumière naturelle. Elle est utilisée pour calculer la composante de l'éclairage due à l'éclairage naturel dans les bâtiments en fonction de la contribution directe du ciel et des réflexions lumineuses (composante directe, composante externe réfléchie et composante interne réfléchie) dans des conditions de ciel couvert.

-La norme NBN L 14-002/A1 pour les calculs sous éclairage artificiel. Elle permet, quant à elle, le calcul point par point des éclairagements sous éclairage artificiel.

### 2.2.2.2. Méthodes de calcul empirique de la déperdition thermique

Le calcul du bilan thermique permet de connaître avec exactitude la quantité d'énergie qu'il faudra pour chauffer ou refroidir un bâtiment. Plusieurs éléments doivent être pris en compte lors de calcul comme la nature, l'exposition, la surface des murs, des parois vitrées, des plafonds, des sols. Ces derniers sont étiquetés multipliés par des coefficients variables selon l'altitude, le rayonnement solaire, la localisation géographique...etc. d'autres éléments doivent aussi être pris en considération comme le renouvellement de l'air, les divers ponts thermiques ainsi que les apports qui pondèrent le calcul comme l'occupation humaine, appareils managers...etc. deux méthodes qui permettent d'évaluation de ses déperditions.

- **Méthode de calcul par coefficient G**

Le G est le coefficient de déperdition volumique du bâtiment, il s'exprime en Watt par mètre cube et par degré. Ce coefficient est actuellement remplacé par le coefficient UBAT, mais le calcul par le coefficient G reste néanmoins pratique d'utilisation, mais d'une fiabilité relative

$$\text{Bilan} = G \times V \times \Delta T$$

**G** : coefficient de déperdition global (W/m<sup>3</sup>. °c)

- 0.65 W/m<sup>3</sup>. °c isolation norme TR 2005
- 0.75 W/m<sup>3</sup>. °c isolation norme TR 2000
- 0.90 W/m<sup>3</sup>. °c construction après 1980
- 1.20 W/m<sup>3</sup>. °c construction moyennement isolées
- 1.80 W/m<sup>3</sup>. °c construction non isolées

**V** : volume du bâtiment (m<sup>3</sup>)

**ΔT** : différence de température entre l'intérieur et l'extérieur

- **Méthode de calcul par le coefficient UBAT**

Le calcul du bilan thermique du bâtiment (la déperdition thermique) se fait par la formule suivante :

$$\text{Déperditions} = D_p \times (19 - T_{\text{ext base}})$$

**D<sub>p</sub>** : représente le coefficient de déperditions du bâtiment (W/K)

$$D_p = U_{\text{BAT}} \times S_{\text{dep}} + R \times V_h$$

**UBAT** : représente la déperdition thermique totale moyenne d'un bâtiment (toutes parois) ( $W/m^2.K$ ), pour une précision optimale, il est recommandé de calculer ce coefficient pour chaque paroi. Les valeurs empiriques d'UBAT sont :

- 0.3 : maison avec une isolation exceptionnelle.
- 0.4 : excellente isolation sans ponts thermique
- 0.75 : pour les maisons à isolation conventionnelle (RT 2005) et réalisées entre 2007 et 2012.
- 0.8 : pour les maisons à isolation conventionnelle (RT 2000) et réalisées entre 2001 et 2006.
- 0.95 : pour les maisons construites entre 1990 et 2000.
- 1.15 : pour les maisons construites entre 1983 et 1989.
- 1.4 : pour les maisons construites entre 1974 et 1982.
- 1.8 : maison non isolée et à menuiseries simples vitrage.

**Sdep** : somme de surfaces des parois ( $m^2$ )

**Vh** : volume habitable de la zone traitée ( $m^3$ )

**R** : coefficient fonction du type de ventilation : VMC autoréglable  $R=0.2$ , VMC hygroréglable  $R=0.14$

**19** : température de confort

**T** est base : température extérieur de base du lieu d'habitation.

## 2.2.3

LES INDICES DU  
CONFORT

Le confort est la résultante d'une interaction complexe de paramètres géographiques, climatiques, personnels, caractéristiques des espaces...qui peut être évalué par le recours à des indices directs, des indices dérivés des directs (qui proviennent des Indices de confort directs) et des indices empiriques.

**2.2.3.1. Les indices directs**

Les indices du confort directs apportent des informations partielles du confort. 1) La Température : cet indice permet de donner une bonne information et parfois elle induit à l'erreur, 2) L'humidité relative : elle est significative dans des valeurs extrêmes, elle est inconfortable lorsque elle est au-dessous de 20-30 % ou au-dessus de 70-80%, 3) la vitesse de l'air qui doit être associée avec d'autres indices afin qu'elle soit significative.

**2.2.3.2. Les indices dérivés des directs**

Ces indices proviennent des Indices de confort directs, on trouve : la Température moyenne radiante, la Température équivalente, la Température opérative et la Température opérative humide. La Température moyenne radiante est la moyenne pondérée des températures des parois qui représente la Température uniforme d'un corps noir avec lequel l'individu échange la même quantité de chaleur qu'avec son environnement immédiat. On peut obtenir cette valeur avec un thermomètre de globe noir ou capteur de température globe noir ( $T_g$ ) la température sèche ( $T_s$ ) et la vitesse de l'air ( $v_a$ ).

$$T_{mr} : T_g + 0.24(T_g - T_s)v_a^{1/2} \quad (4)$$

La Température opérative humide représente la variation de l'indice précédent qui prend en compte un état de saturation afin que les échanges soient par convection, radiation mais aussi par évapotranspiration.

Tableau 1. Exemple de condition de confort à l'intérieur d'un bâtiment. (*bibliog. Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible F. Javier Neila Gonzalez, pp.233*).

Saison	Température opérative (°c)	Vitesse moyenne de l'air (m/s)	Humidité relative (%)
Ete	23...25	0.18...0.24	40...60
Hiver	20...23	0.15...0.20	40...60

La Température opérative est la température d'une parcelle d'air dont on aurait complètement retiré sa vapeur d'eau par un processus adiabatique. L'air atmosphérique est de l'air humide : il est composé d'air sec et de vapeur d'eau. Prenons un petit volume d'air humide qui est à une température T et avec un rapport de mélange r. Si on l'assèche totalement par condensation et qu'on élimine l'eau, le volume d'air aura une température supérieure qui dépend du relâchement de la chaleur latente de condensation:.... (5)

$$\text{Température opérative} = \frac{\text{Température de l'air} + \text{Température des parois}}{2}$$

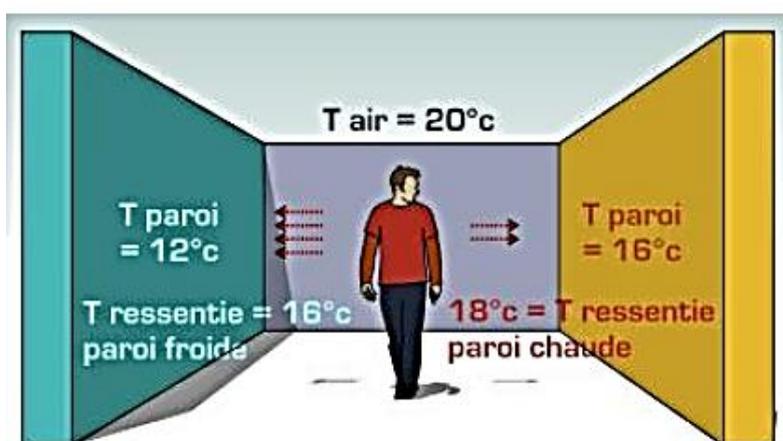


Figure 21. La Température opérative  
(Confort hygrothermique et réduction des consommations d'énergie, 2014)

### 2.2.3.3. Indices empiriques

Il existe une multitude des indices empirique permettant l'évaluation de la notion du confort, on peut citer : la Température effective, l'Indice de refroidissement par le vent, le Degré de satisfaction observe, le Degré de satisfaction prévu, le Pourcentage de personnes satisfaites, etc...L'indice De Vote Moyen Prévisible, (PMV Predicted Mean Vote) donne l'avis moyen d'un groupe important de personnes qui exprimeraient un vote de sensation de confort thermique en se référant à l'échelle suivante :

- Une valeur de PMV de zéro exprime une sensation de confort thermique optimale.
- Une valeur de PMV négative signifie que la température est plus basse que la température idéale.
- Réciproquement, une valeur positive signale qu'elle est plus élevée.

Dans la détermination de l'indice de vote moyen prévisible interviennent plusieurs facteurs tels que: L'activité, le métabolisme  $W/m^2$ , le travail  $W/m^2$ , la relation entre la surface du corps habillé et nue, la température sèche de l'air  $^{\circ}C$ , la température moyenne radiante  $^{\circ}C$ , la pression de vapeur Pa, le coefficient de convection  $W/m^2^{\circ}C$ , la Température superficielle habits  $^{\circ}C$  ainsi que la Résistance thermique des habits  $m^2C/W$ .

#### 2.2.3.4. Analyse PMV/PPD de la sensation de confort hygrothermique

Le Pourcentage Prévisible D'insatisfaits (PPD Predicted Percentage Dissatisfied) donne, en fonction de l'indice PMV d'une situation thermique précise, le pourcentage de personnes insatisfaites par rapport à la situation. Connaissant l'indice de vote moyen prévisible PMV, la figure ci après permet d'évaluer directement PPD. On considère que la zone de confort thermique s'étale de la sensation de légère fraîcheur (1) à la sensation de légère chaleur (+ 1), soit de -1 à + 1.

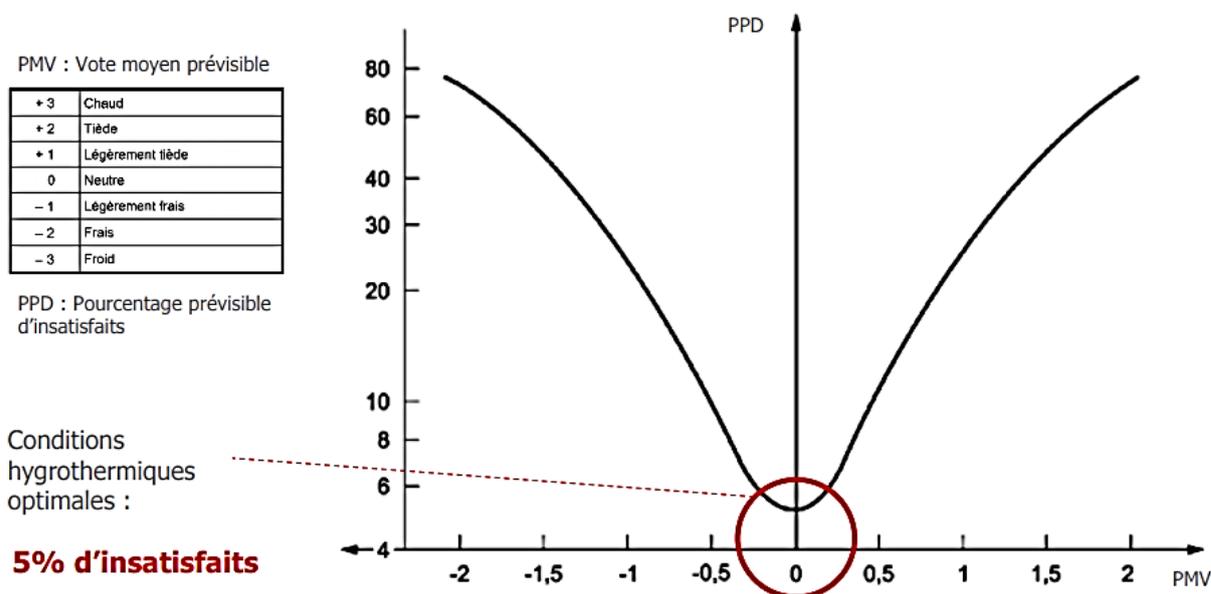


Figure 22. Analyse PMV/PPD de la sensation de confort hygrothermique (Confort hygrothermique et réduction des consommations d'énergie, 2014)

## 2.2.4

LA SIMULATION  
NUMÉRIQUE

Il est maintenant établi que l'outil informatique est un élément indispensable à l'architecte dans sa pratique actuelle et future. Tant dans le dessin des projets que dans leur communication, l'utilisation de l'informatique apporte précision et gain de temps.

**2.2.4.1. Les méthodes informatiques**

Les méthodes informatiques sont fréquemment utilisées dans la phase de design et de modélisation d'un système d'éclairage, de chauffage, de ventilation ou de climatisation des bâtiments neufs ou existants, afin d'optimiser au maximum sa performance. En ce qui concerne l'approche basée sur le logiciel numérique, et avec le développement que connaît le domaine informatique, différents types de simulations permettent de prédire et de calculer les paramètres du confort dans le bâtiment telles que la simulation de l'éclairage, de thermique, de l'acoustique, de la consommation énergétique et même celle de éolique (à l'échelle urbaine).

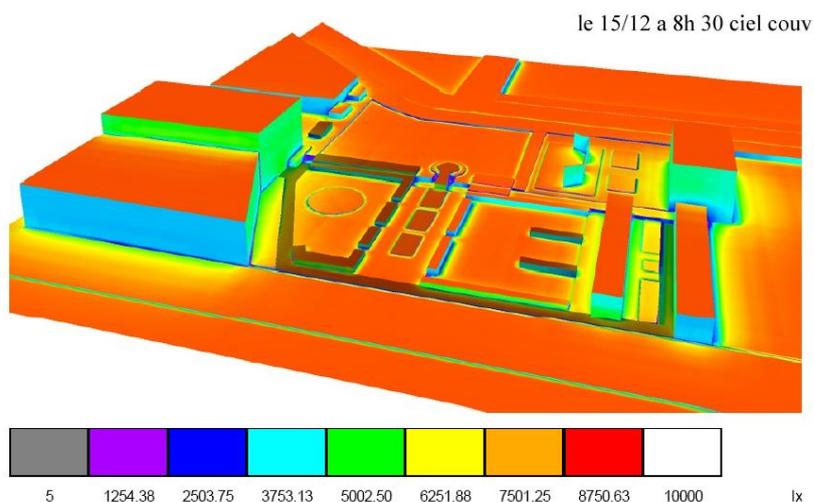


Figure 23. Simulation thermique à l'échelle urbaine (source : Auteur)

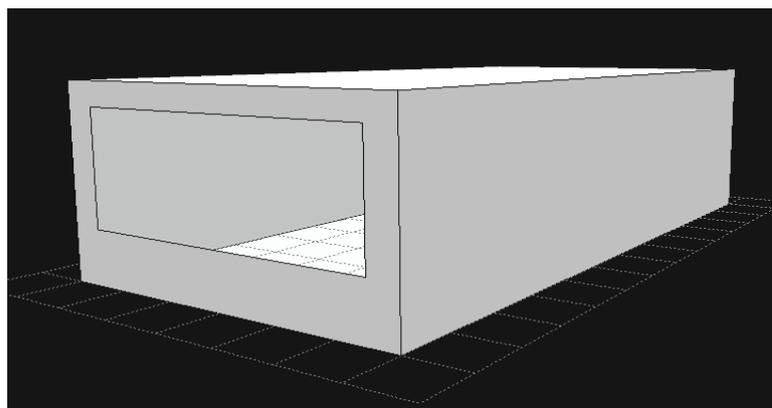


Figure 24. Model numérique pour la simulation (source : Daich, 2011)

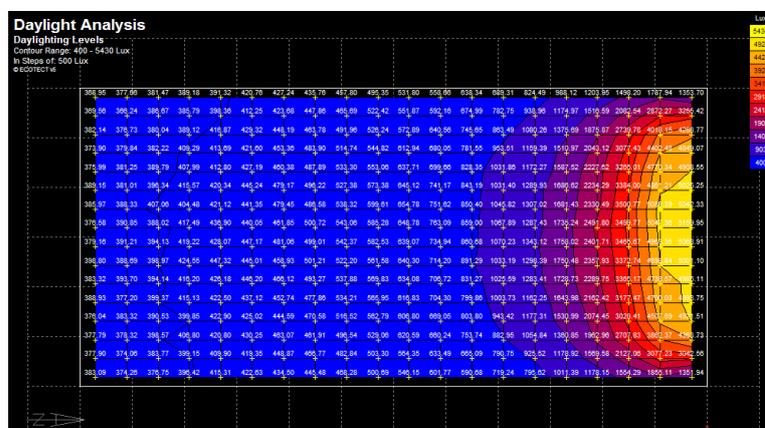


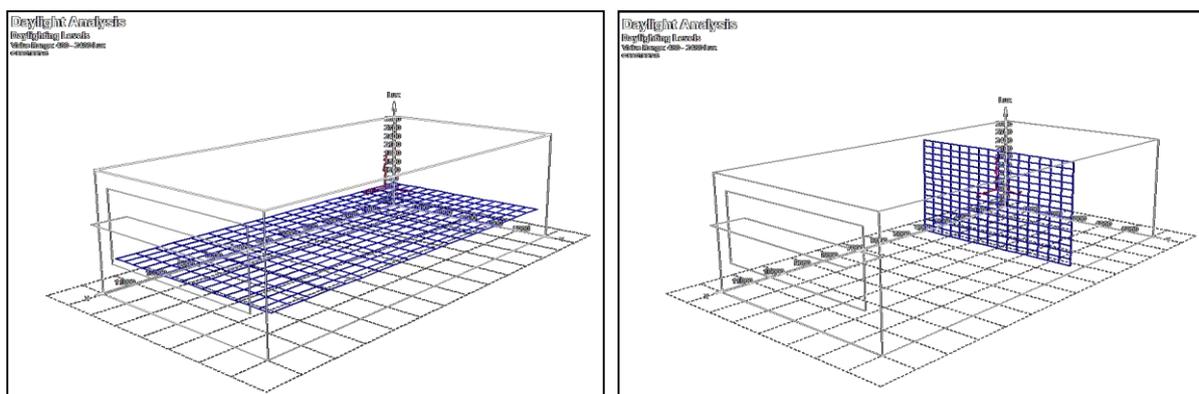
Figure 25. Simulation de l'éclairage à l'échelle architecturale (source : Daich, 2011)

Les paramètres de la simulation d'un phénomène physique dans le bâtiment se basent sur des paramètres constants et d'autres variables. Les paramètres constants sont les suivants :

- La location géographique du lieu (latitude, longitude et altitude).
- La zone : Urbaine/ Rural.
- Le type du ciel : ciel intermédiaire, couvert ou serin.
- Le logiciel de simulation
- La géométrie du local :
  - Le local : Largeur, longueur, hauteur.
  - La fenêtre : Largeur, longueur, hauteur sous plafond, hauteur de l'allège.
- Les matériaux :
  - Les murs : paroi intérieure.
  - La dalle : paroi intérieure.

- Le plafond : paroi intérieure.
- Le light shelf : partie intérieure.
- Le vitrage.

La grille structurelle permet de diviser l'espace en grille, puis en points. Ces points peuvent être codés soit par des chiffres (1, 2,...) soit par le système chiffres et lettres (a1, a2, b1, B2,...). La grille utilisée dans la simulation a été faite à 0.9m du sol, représentant la hauteur plan de travail. Dans le but de voir les fluctuations des niveaux de lumière naturelle à partir de la fenêtre vers la face opposée de l'espace, nous proposons une autre grille verticale.



*Figure 26. La grille structurelle : à gauche, grille structurelle horizontale ; à droite, grille structurelle verticale (source : Daich, 2011)*

Avantages et Place des outils de simulation dans les projets de qualité environnementale :

1. Aide au dessin de la géométrie des pièces (trame...), au dimensionnement des surfaces vitrées, au choix de dispositifs de protections solaires et de revêtements intérieurs.
2. Pour les projets certifiés (référentiels exigeant la réalisation de calculs d'éclairage naturel).
3. A des fins pédagogiques auprès du maître d'ouvrage pour justifier certains dispositifs.
4. En bureau, pour permettre une aide à la conception pour l'aménagement des locaux.

## 2.2.5

## LES MODELES PHYSIQUES

Au cours de la conception architecturale, les architectes recourent souvent à la réalisation des maquettes ; ces dernières sont des modèles réduits de la réalité qui permettent à l'architecte de garder les mêmes propriétés géométriques du bâtiment réel mais avec une échelle plus petite. Ce modèle physique facilite le choix de la forme, la structure, la géométrie des façades...etc. et permet d'étudier les phénomènes lumineux, acoustiques et éoliques alors que les phénomènes thermiques et l'étude de l'éclairage artificiel restent toujours difficile à modéliser.

### 2.2.5.1. Modèles physiques pour l'étude de l'éclairage

Les modèles étudiant la lumière peuvent donner des résultats qualitatifs et quantitatifs très précis. En tenant compte de la perception visuelle humaine, on ne discerne aucune différence visuelle entre la réalité et un modèle réduit. Lorsqu'on construit la maquette d'un local de manière précise, tout en respectant sa géométrie, les caractéristiques de ses parois intérieures (couleurs, matériaux ...etc) et de son mobilier. On retrouvera la même quantité et qualité de lumière que celle que l'on a dans le local réel (sous des conditions de ciel identiques). L'impression visuelle que l'on aura sera très proche à celle que l'on ressentira dans le local réel.



Figure 27. Modèle physique échelle 1/4 (source : Daich et al, 2016)

Le choix d'échelle de la maquette diffère selon le cas de l'étude. Cette échelle va de 1/500 jusqu'à l'échelle réelle de l'objet. Nous trouvons trois modèles : des maquettes de masse qui se présentent généralement à l'échelle de 1/200 ou à l'échelle de 1/100 dans certains cas, des modèles étudiant les performances des bâtiments à l'échelle de 1/50 alors que l'étude de l'efficacité des éléments de contrôle et les nouveaux matériaux ainsi que la simulation des détails des ouvertures...etc. se fait par des maquettes à petites échelles de 1/10 jusqu'à l'échelle réelle et nécessitent plus de précision dans leurs réalisations. La taille du modèle réduit peut également être déterminée par le type de visualisation que l'on veut réaliser ou par la taille du matériel de mesure ainsi que par la taille du ciel lui-même. L'intégration d'une caméra à l'intérieur de la maquette doit prendre en compte plusieurs facteurs ; il faut penser au fait que le centre de la lentille doit se trouver à la hauteur de l'œil, entre 1,5 et 1,7 m. De plus, il faut tenir compte de la taille des cellules de mesure d'éclairement ou de luxmètres. Pour prendre des photos, on utilise en général des objectifs macros dont la focale est inférieure à 28 mm ce qui permet d'obtenir une image nette à une distance très proche. Pour cela, il faut que la maquette prévoie une hauteur sous plafond au minimum de 15cm et une profondeur minimale de la pièce de 30 cm.



*Figure 28. Modèle physique échelle 1/4 (source : Daich et al, 2011)*

Pour la construction de modèles réduits, on peut employer presque tout matériau utilisé habituellement en architecture. Le carton mousse est généralement utilisé pour modéliser les parois. Ce carton est de 1 cm d'épaisseur au minimum et constitué de différentes couches ainsi, il présente l'avantage de se découper facilement. Le seul inconvénient est une légère transparence à la lumière. La transmission de la lumière à travers les parois du modèle peut être due aux défauts d'opacité des parois ou à des défauts dans les liaisons entre parois, et qui peuvent entraîner des erreurs de mesures non négligeables dans le cas de pièces à faibles facteurs de lumière du jour.

Afin d'assurer l'opacité du modèle, il convient également de placer du collant noir tout le long des intersections entre les différents éléments du modèle.



*Figure 29. Modélisation des parois échelle 1/4 (source : Daich, 2019)*

Il existe trois méthodes connus permettant de vérifier l'étanchéité du modèle à la lumière. La première consiste de placer le modèle réduit en plein soleil et de vérifier qu'aucune lumière n'est visible au travers des parois. La deuxième, est une méthode inverse, elle consiste de se placer dans un local obscur et d'allumer une source lumineuse à l'intérieur du modèle réduit. Si aucun rayon de lumière n'est visible, le modèle sera considéré comme étanche à la lumière. La dernière méthode, qui est la plus précise, elle consiste d'obstruer tous les ouvertures du modèle et de mesurer la luminance dans la pièce, si toute la lumière pénètre dans le modèle, cela signifie qu'il y'a un défaut d'opacité. Donc, la modélisation des parois du modèle réduit nécessite une grande précision. Les parois du modèle doivent être bien raccordées afin d'éviter toute pénétration de lumière. Les cloisons internes ont beaucoup d'influence sur la répartition et la quantité de lumière dans la pièce. Il est essentiel de les modéliser. Dans les endroits que l'on veut pouvoir modifier. La pratique montre que l'utilisation d'épingles offre une grande souplesse en matière de modifications.



*Figure 30. Test d'étanchéité (source : Daich, 2019)*

La modélisation des mobiliers est très importante dans l'analyse quantitative et qualitative de l'éclairage sur modèle réduit. Elle demande plus d'effort que la modélisation des cloisons. La disposition du mobilier, sa couleur ainsi que les matériaux utilisés pour le modéliser influencent la répartition de la lumière dans la pièce. Si le mobilier est de couleurs claires, il va réfléchir la lumière qu'il reçoit et va la distribuer dans la pièce. Ainsi, les couleurs des mobiliers participent à l'ambiance lumineuse de l'espace, surtout si nous désirons étudier la qualité de l'espace. Le mobilier doit être fixe dans la maquette afin d'éviter son déplacement lors de la simulation. Donc, il est intéressant de modéliser le mobilier dans la maquette, afin d'arriver à des résultats plus précises.



*Figure 31. A gauche, Modélisation des mobilier ; à droite, ambiance intérieure  
(source : Daich, 2019)*

Il est important de bien choisir le matériau modélisé qui correspond le mieux au matériau à modéliser, surtout dans les études de l'éclairage afin d'obtenir des résultats précises et proche de la réalité. Les coefficients de réflexion des matériaux ainsi que la nature de la réflexion doivent correspondre précisément à ceux des matériaux réels. Notons, qu'il faut prendre en considération d'autres facteurs étrangers qui peuvent fausser les résultats, nous citons : la poussière, la saleté et la texture de la surface...etc. Car elles peuvent réduire le facteur de réflexion. Le choix du matériau à utiliser dépendra aussi de l'analyse photographique qui peut se faire au moyen de photos couleurs ou noir et blanc. Pour des photographies couleur, de manière à avoir une perception réaliste de l'espace, il faut que les surfaces modélisées aient la même couleur que les surfaces réelles alors que, si l'analyse est réalisée au moyen de photos noir et blanc, seul le coefficient de réflexion des parois devra correspondre à celui de la paroi réelle. Le tableau suivant donne les coefficients de réflexion de certains cartons utilisés pour réaliser un modèle réduit :

Tableau 2. Coefficients de réflexion de certains matériaux (Source : Bodart et Deneyer, 2008)

Type de surface	Couleur surface	Y	Carton correspondant	Y	Couleur
		Coeff réflexion (%)	Marque Canson	Coeff réflexion (%)	carton
Table	beige clair	76.33	Mi teinte 100	75.45	Vert clair
Tapis	vert-gris	13.46	Mi teinte 448	11.53	Vert
Mur - paroi	beige clair	67.68	Mi teinte 104	67.83	mauve clair
Tablette dessus armoire	beige clair	75.52	Mi teinte 100	75.45	vert clair
Paroi armoire	noir	7.97	Mi teinte 503	8.73	bordeau
Porte avant armoire	noir	8.74	Mi teinte 503	8.73	bordeau
Porte 1	brun clair	51.27	Mi teinte 470	56.92	ocre
Porte 1 bis	brun clair	51.85	Mi teinte 470	56.92	ocre
Châssis porte int 1	gris peinture	28.34	Mi teinte 431	25.59	gris
Châssis porte int 1 bis	gris peinture	28.24	Mi teinte 431	25.59	gris
Tablette sous fenêtre	gris peinture	28.76	Mi teinte 431	25.59	gris
Mur sous fenêtre	blanc	68.03	Mi teinte 407	68.17	beige
Plinthe sous fenêtre	brun clair	38.16	Mi teinte 354	38.79	gris
Mur sous fenêtre latérale	gris peinture	27.28	Mi teinte 431	25.59	gris
Tissus fauteuil	vert	11.61	Mi teinte 448	11.53	vert
Plafond troué 1	beige	60.71	Mi teinte 400	60.06	jaune
Plafond troué 1 bis	beige	60.56	Mi teinte 400	60.06	jaune
Socle porte manteau	noir	6.00	Mi teinte 425	3.89	noir
Feuille présentoir	blanc	78.63	Mi teinte 101	79.46	jaune clair
Feuille porte	blanc	67.26	Mi teinte 104	67.83	Mauve clair
Latte horizontale plafond	beige	76.36	Mi teinte 100	75.45	Vert clair
Bois du plateau	brun foncé	13.38	Mi teinte 448	11.53	Vert

Les obstructions extérieures peuvent être des bâtiments voisins, des arbres, une colline...etc, elles influencent de manière considérable la quantité de lumière que peut recevoir un local, c'est pour cela, elles doivent être modélisées précisément. Par exemple, si le bâtiment voisin est plus haut que le bâtiment à modéliser, cette obstruction va porter de l'ombre sur le bâtiment à modéliser et par conséquent, elle va réduire la pénétration de la lumière à l'intérieur du local. Par contre, si les murs du bâtiment voisin sont construits par des matériaux réfléchissant, ils vont réfléchir à leurs tours la lumière sur le bâtiment à modéliser ce qui permet d'augmenter la quantité de lumière à l'intérieur du bâtiment. C'est pour cette raison, la modélisation des obstructions extérieures doit tenir compte la taille, la couleur, le matériau et surtout le coefficient de réflexion.

L'étude de l'éclairage sur un modèle réduit nécessite l'utilisation des instruments de mesure tels que le luxmètre, la luminance mètre...etc. Ainsi, nous devons déterminer et bien marquer les points de mesure lors de la réalisation du modèle afin de faciliter l'emplacement des capteurs. Les mesures de l'éclairement peuvent être effectuées horizontalement (sur le plan de travail) ou

verticalement (sur les murs). Donc, on doit pouvoir accéder à l'intérieur du modèle pour placer ses instruments à proximité des points de mesure. Nous avons trois possibilités, soit on les fait passées par les ouvertures tels que les fenêtres tout en faisant attention que les fils des luxmètres ne passent pas au travers d'une ouverture qui devra être enlevée au cours de la simulation. S'il n'y a pas d'ouverture permettant le passage des sondes, il convient de prévoir la possibilité d'enlever et de remettre facilement et rapidement une des parois du modèle. La troisième solution consiste à prévoir un petit trou qui fera environ 1 cm, permettant le passage des fils au travers d'une des parois verticales. Ce trou doit être parfaitement obstrué au moment où les mesures sont réalisées afin d'éviter la transmission de la lumière au travers. La pratique montre que pour effectuer les mesures de l'éclairage de manière parfaite et placer facilement les capteurs, la caméra (57 mm de diamètre) ainsi que réaliser des observations visuelles, le modèle réduit doit avoir au moins une paroi amovible, soit au niveau de la façade soit au niveau du plafond selon la nature de l'étude.

#### **2.2.5.2. Modèles physiques pour l'étude de l'acoustique**

L'utilisation de maquettes acoustiques tridimensionnelles fait suite à diverses premières tentatives de mise au point de simulations par modèle physique ou analogique de la propagation en espace clos. En 1965, afin d'étudier les propriétés sonores de théâtres antiques, Canac6 réalise une série de mesures sur des maquettes (figure 8) à l'aide d'ultrasons dont la fréquence est choisie en fonction des lois de similitude ; la longueur d'onde est réduite selon le facteur d'échelle de la maquette. La maquette acoustique peut être construits en échelle de 1/100 jusqu'à échelle 1/5 selon le type de l'étude.



*Figure 32. Maquette du théâtre d'orange ([https://www.canal-u.tv/video/cerimes/acoustique\\_des\\_theatres\\_antiques.9038](https://www.canal-u.tv/video/cerimes/acoustique_des_theatres_antiques.9038))]*

## 2.3

# MÉTHODES DE DIAGNOSTIC ENERGETIQUE

## INTRODUCTION

Les calculs préliminaires à la construction ont donné une prévision pour la consommation d'énergie. La consommation dépend cependant fortement du comportement des habitants ( $\pm 50\%$  par rapport à un comportement moyen). La mesure de la consommation effective permet de détecter des défauts de fonctionnement, et une interprétation subtile permet de placer un diagnostic sur les causes des défauts.

### **2.3.1. Les méthodes de diagnostic**

Une fois le bâtiment réalisé ou pour un bâtiment existant à réhabiliter, des mesures sont nécessaire autant pour savoir si le bâtiment fonctionne comme prévu que pour contrôler sa bonne marche au cours du temps. Ces mesures peuvent avoir plusieurs buts et peuvent être classées par objectif de la mesure ou par objet mesuré. Dans cette section, nous allons présenter quelques méthodes de mesure spécifiquement utiles pour le contrôle de fonctionnement d'une habitation du point de vue énergétique.

#### **2.3.1.1. Mesure de consommation**

La mesure de la quantité d'énergie consommée pendant un certain intervalle de temps dépend du vecteur énergétique. Pour l'électricité et le gaz du réseau, il suffit de lire les compteurs correspondants au début et à la fin de l'intervalle.

#### **2.3.1.2. Indice de dépense d'énergie (IDE)**

Indice de dépense d'énergie (IDE) On obtient cet indice en divisant la consommation annuelle d'énergie totale (de tous les agents énergétiques) exprimée en MJ par la surface brute de plancher chauffé (murs inclus). La norme SIA 180/4 donne le mode de calcul exact. On donne en 14.9 une formule de calcul. Cette mesure simple a surtout un but statistique servant en première analyse. La comparaison de cet indice avec les valeurs statistiques connues permet de savoir si le bâtiment est un gros ou un petit consommateur.

#### **2.3.1.3. Signature énergétique**

Signature énergétique Pour un diagnostic plus fin, la consommation d'énergie doit être mesurée à intervalle plus restreints que l'année. Pour ce faire, on relève périodiquement les consommations de combustibles et/ou d'électricité utilisés pour le chauffage. La période de mesure est typiquement une semaine pour les mesures manuelles, mais peut être plus courte (1 heure) pour les mesures automatiques. La température extérieure moyenne pendant la même période est obtenue soit par une mesure automatique, soit puisée dans les publications météorologiques, pour la station météorologique la plus proche.

Pour chaque période de mesure, on reporte un point sur un diagramme avec la température extérieure moyenne en abscisse et la puissance moyenne (énergie consommée divisée par la durée de la période) en ordonnée. Pendant la saison de chauffage, après un certain nombre de périodes, on peut tracer une droite passant le mieux possible au travers du nuage de points obtenus (Figure 33).

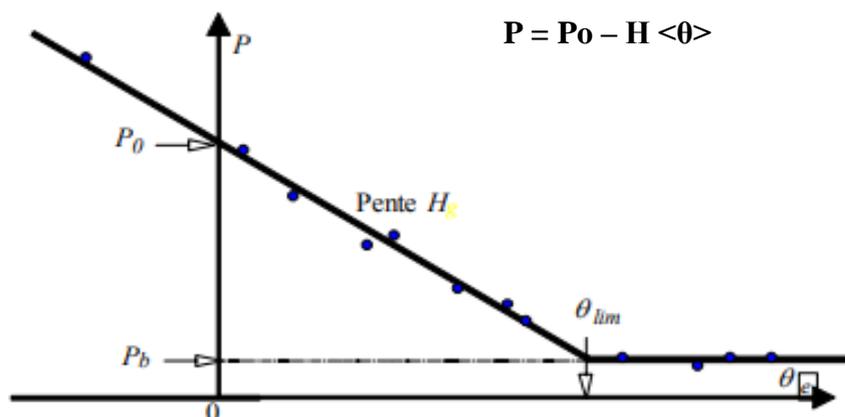


Figure 33. Principe de la signature énergétique (source : Roulet, 2000)

Cette droite est caractérisée par la puissance  $P_0$  à  $0^\circ\text{C}$  et la pente  $H$ , appelée signature énergétique du bâtiment. Où  $\langle \theta \rangle$  est la température extérieure moyenne de la période de mesure considérée.

#### 2.3.1.4. Méthode H-m

La dispersion des points de la signature énergétique peut devenir importante dans les bâtiments solaires passifs, parce que dans ces bâtiments, les gains solaires représentent une part appréciable des apports de chaleur. Il faut alors tenir compte du rayonnement solaire dans la régression. Reprenons l'équation du bilan thermique du bâtiment : Comparons l'équation de la signature au bilan thermique moyen du bâtiment :

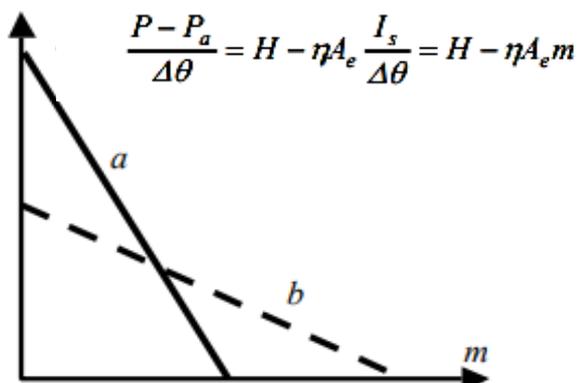


Figure 34. Principe de méthode H-m (source : Roulet, 2000)

La droite a représente un bâtiment très vitré, à relativement fortes déperditions, mais à gains solaires importants. La droite b représente un bâtiment bien isolé mais à faibles gains solaires. Où  $m$  est une variable "météorologique". La droite de régression a le coefficient de déperditions du bâtiment pour abscisse à l'origine, et sa pente,  $\eta A_e$ , est le produit de la surface efficace de captage et du taux d'utilisation, et représente la capacité du bâtiment à utiliser le rayonnement solaire.