

Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté d'architecture, Génie Civil, Hydraulique  
Département D'architecture

Master 2 : Académique

Thématique 3 : Architecture, environnement et technologies

# **EVALUATION DU CONFORT DANS LE BATIMENT ET DIAGNOSTIC ÉNERGETIQUE**

Préparé par : **Saadi Mohamed Yacine**

**Année universitaire : 2025/2026**

# 1. LISTE DES MATIERE

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Préface .....                                                                      | 5   |
| I le confort dans le bâtiment.....                                                 | 9   |
| I.1 le confort hygrothermique.....                                                 | 10  |
| 1.1.1. Le métabolisme de l'homme, (M).....                                         | 11  |
| 1.1.2. Transfert thermique du corps humain .....                                   | 12  |
| 1.1.3. Bilan thermique du corps humain.....                                        | 13  |
| 1.1.4. Bilan thermique global d'un habitat/ bâtiment.....                          | 13  |
| 1.1.5. Bilan thermique global (Homme et Habitat).....                              | 14  |
| 1.1.6. Paramètres influant sur le confort hygrothermique .....                     | 14  |
| I.2 le confort visuel .....                                                        | 21  |
| 1.2.1. La perception de la lumière.....                                            | 22  |
| 1.2.2. Le champ visuel.....                                                        | 22  |
| 1.2.3. La perception des couleurs.....                                             | 24  |
| 1.2.4. La performance visuelle.....                                                | 25  |
| 1.2.5. Les critères du confortvisuel.....                                          | 26  |
| 1.2.6. Les paramètres du confort visuel.....                                       | 28  |
| I-3 le confort acoustique .....                                                    | 36  |
| 1.3.1. Rappel des notions de base.....                                             | 37  |
| 1.3.2. Définition du bruit.....                                                    | 37  |
| 1.3.3. La propagation du bruit .....                                               | 38  |
| 1.3.4. Solutions contre le gêne acoustique.....                                    | 39  |
| 1.3.5. La propagation des ondes sonores.....                                       | 41  |
| I.4. Le confort olfactif .....                                                     | 44  |
| 1.4.1. La gêne olfactive.....                                                      | 45  |
| II. Méthodes D'évaluation et de diagnostic.....                                    | 48  |
| II.1 le développement durable et la qualité environnementale .....                 | 49  |
| 2.1.1. Les enjeux du développement durable et de la qualité environnementale.....  | 50  |
| 2.1.2. Evolutions techniques et réglementaires.....                                | 50  |
| 2.1.3. Le grenelle de l'environnement.....                                         | 52  |
| 2.1.4. Enjeux des certifications et labels .....                                   | 52  |
| 2.1.5. Les concepts de bâtiments performants.....                                  | 53  |
| II.2. Les méthodes d'évaluation du confort.....                                    | 54  |
| 2.2.1. Les mesures n situ.....                                                     | 55  |
| 2.2.2. Méthodes de calcul empirique de l'éclairage.....                            | 57  |
| 2.2.3. Les indices directs.....                                                    | 60  |
| 2.2.4. Les méthodes informatiques.....                                             | 62  |
| 2.2.5.1. Modèles physiques pour l'étude de l'éclairage.....                        | 65  |
| II. 3. Méthodes de diagnostic.....                                                 | 71  |
| 2.3.1. Les méthodes de diagnostic.....                                             | 72  |
| III.1. les logiciels de simulation et de modélisation.....                         | 77  |
| III.1. Simulation de l'éclairage.....                                              | 78  |
| 3.1.1. Les types de simulateurs.....                                               | 79  |
| 3.1.2. Les logiciels de simulation de l'éclairage dans le bâtiment .....           | 82  |
| 3.2. Simulation thermique et energetique.....                                      | 92  |
| 3.2.1. Historique des environnements de simulation énergétique des bâtiments ..... | 93  |
| 3.3. Simulation de l'acoustique.....                                               | 101 |
| 3.3.1. Logiciels de simulation acoustique.....                                     | 102 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| Référence bibliographique..... | 106 |
|--------------------------------|-----|

## 2. LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. Transferts thermiques du corps humain.....                                                                                                                                     | 12 |
| Figure 2. Transferts thermiques dans un bâtiment.....                                                                                                                                    | 14 |
| Figure 3. Les paramètres du confort hygrothermique.....                                                                                                                                  | 15 |
| Figure 4. Stratégies pour atténuer le confort hygrothermique.....                                                                                                                        | 16 |
| Figure 5. Diagramme Bioclimatique.....                                                                                                                                                   | 18 |
| Figure 6. L'homogénéité des ambiances hygrothermiques.....                                                                                                                               | 19 |
| Figure 7. Le choix des équipements.....                                                                                                                                                  | 20 |
| Figure 8. Le champ visuel.....                                                                                                                                                           | 23 |
| Figure 9. Le champ visuel.....                                                                                                                                                           | 23 |
| Figure 10. Le diagramme de Kruithof.....                                                                                                                                                 | 27 |
| Figure 11. Les paramètres du confort visuel.....                                                                                                                                         | 28 |
| Figure 12. Rapports de luminance présents dans le local : à gauche, Les sensations relatives aux différents niveaux de contraste ; à droite, Valeurs recommandées pour le contraste..... | 34 |
| Figure 13. Les caractéristiques d'une onde acoustique.....                                                                                                                               | 39 |
| Figure 14. La réverbération dans une salle.....                                                                                                                                          | 43 |
| Figure 15. Le comportement physique d'une onde acoustique dans un auditorium .....                                                                                                       | 44 |
| Figure 16. La propagation d'une onde sonore.....                                                                                                                                         | 44 |
| Figure 17. Evolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2017.....                                                                                                     | 51 |
| Figure 18. Répartition des émissions mondiales de GES.....                                                                                                                               | 52 |
| Figure 19. Matériels de mesure in situ.....                                                                                                                                              | 57 |
| Figure 20. Diagramme de Waldram.....                                                                                                                                                     | 58 |
| Figure 21. La Température opérative.....                                                                                                                                                 | 62 |
| Figure 22. Analyse PMV/PPD de la sensation de confort hygrothermique.....                                                                                                                | 63 |
| Figure 23. Simulation thermique à l'échelle urbaine.....                                                                                                                                 | 64 |
| Figure 24. Model numérique pour la simulation.....                                                                                                                                       | 64 |
| Figure 25. Simulation de l'éclairage à l'échelle architecturale.....                                                                                                                     | 64 |
| Figure 26. La grille structurelle : à gauche, grille structurelle horizontale ; à droite, grille structurelle verticale.....                                                             | 65 |
| Figure 27. Modèle physique échelle ¼ .....                                                                                                                                               | 66 |
| Figure 28. Modèle physique échelle ¼ .....                                                                                                                                               | 67 |
| Figure 29. Modélisation des parois échelle ¼.....                                                                                                                                        | 67 |
| Figure 30. Test d'étanchéité.....                                                                                                                                                        | 68 |
| Figure 31. A gauche, Modélisation des mobiliers ; à droite, ambiance intérieure .....                                                                                                    | 69 |
| Figure 32. Maquette du théâtre d'orange. ....                                                                                                                                            | 71 |
| Figure 33. Principe de la signature énergétique .....                                                                                                                                    | 75 |
| Figure 34. Principe de méthode H-m .....                                                                                                                                                 | 75 |
| Figure 35. Schéma de principe de la Mirror box .....                                                                                                                                     | 80 |
| Figure 36. Ciel artificiel à une lampe .....                                                                                                                                             | 81 |
| Figure 37. Vue en coupe des disques du dôme .....                                                                                                                                        | 81 |
| Figure 38. Soleil artificiel à une lampe : à gauche, Dispositif de ciel au-dessus et de soleil en dessous ; à droite, Soleil mécanique.....                                              | 82 |
| Figure 39. Résultat de la simulation de la lumière sous Ecotect .....                                                                                                                    | 84 |
| Figure 40. DIAL LUX output.....                                                                                                                                                          | 86 |
| Figure 41. Simulation sous DIAL+ : A gauche, résultat de FLJ ; à droite, résultat de daylight autonomie.....                                                                             | 87 |

|                                                                                                                                                    |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Figure 42.</b> Simulation sous RELUX : à gauche, lignes de contours de l'éclairage artificiel ; à droite, un rendu d'une salle sous Relux ..... | <b>88</b>  |
| <b>Figure 43.</b> Radiance : A gauche, rendu fausse couleur ; à droite, rendu photo réaliste .....                                                 | <b>91</b>  |
| <b>Figure 44.</b> Historique des environnements de simulation énergétique des bâtiments .....                                                      | <b>94</b>  |
| <b>Figure 45.</b> Interface graphique du AcouBAT .....                                                                                             | <b>102</b> |
| <b>Figure 46.</b> Interface graphique du MithraSound .....                                                                                         | <b>103</b> |
| <b>Figure 47.</b> Output du logiciel Ecotect : Etude du son .....                                                                                  | <b>104</b> |
| <b>Figure 48.</b> Interface graphique du MithraSound .....                                                                                         | <b>105</b> |

### 3. LISTE DES FIGURES

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tableau 1.</b> Exemple de condition de confort à l'intérieur d'un bâtiment. .... | <b>60</b> |
| <b>Tableau 2.</b> Coefficients de réflexion de certains matériaux. ....             | <b>69</b> |
| <b>Tableau 3.</b> Les différents logiciels de simulation de l'éclairage.....        | <b>82</b> |

# PREFACE

Le maintien de conditions de confort optimales à l'intérieur des bâtiments constitue aujourd'hui l'une des préoccupations majeures des concepteurs, architectes et ingénieurs du bâtiment. En effet, assurer le bien-être des usagers tout en répondant aux exigences fonctionnelles et environnementales représente un défi complexe qui nécessite une approche globale et multidisciplinaire. Pendant longtemps, les stratégies adoptées pour atteindre le confort thermique, visuel ou acoustique ont reposé principalement sur une forte consommation énergétique, notamment à travers l'utilisation intensive des systèmes de chauffage, de climatisation, de ventilation et d'éclairage artificiel. Cette dépendance énergétique a entraîné une augmentation considérable des émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la pollution environnementale et à la dégradation progressive des écosystèmes terrestres.

Dans ce contexte, les enjeux liés au développement durable, à la transition énergétique et à la préservation des ressources naturelles ont conduit à une remise en question des modes traditionnels de conception architecturale et de gestion énergétique des bâtiments. Les recherches scientifiques et technologiques se sont alors orientées vers l'élaboration de solutions innovantes permettant de concilier confort des occupants, efficacité énergétique et respect de l'environnement. L'intégration des principes bioclimatiques, l'utilisation des matériaux performants, l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment ainsi que le recours aux énergies renouvelables constituent désormais des axes essentiels dans la conception architecturale contemporaine.

Parallèlement, les progrès remarquables réalisés dans le domaine de l'informatique et des technologies numériques ont permis le développement d'outils avancés de simulation et de modélisation énergétique. Ces outils offrent aux professionnels du bâtiment la possibilité d'analyser, de prévoir et d'optimiser les performances environnementales et énergétiques des constructions dès les premières phases de conception. Les logiciels de simulation jouent aujourd'hui un rôle fondamental dans l'évaluation du comportement thermique des bâtiments, l'analyse des consommations énergétiques et l'étude des conditions de confort des usagers.

Un logiciel de simulation performant doit être capable de traiter des problématiques complexes liées au fonctionnement réel des bâtiments. Il doit notamment permettre l'étude des phénomènes

de surchauffe dans les bâtiments fortement isolés, largement vitrés et naturellement ventilés. De plus, il doit intégrer les systèmes HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), les équipements techniques réalistes ainsi que différentes technologies innovantes telles que la cogénération, les systèmes solaires thermiques, les matériaux à changement de phase, les procédés de sorption ou encore les façades intelligentes et actives. Ces logiciels permettent également de tester plusieurs scénarios de conception afin d'identifier les solutions les plus performantes en matière d'efficacité énergétique et de qualité environnementale.

Dans cette perspective, l'enseignement de la matière intitulée « Évaluation du Confort dans le Bâtiment et Diagnostic Énergétique » vise à initier les étudiants aux notions fondamentales relatives au confort architectural et à la performance énergétique des bâtiments. Cette matière a pour objectif principal de fournir aux étudiants les outils conceptuels, méthodologiques et techniques nécessaires à l'analyse, à l'évaluation et au diagnostic des conditions de confort et des consommations énergétiques dans les espaces bâtis. Elle permet également de développer une compréhension approfondie des interactions entre l'environnement, l'architecture, les équipements techniques et le comportement des usagers.

L'enseignement proposé cherche aussi à sensibiliser les étudiants aux enjeux environnementaux contemporains et à l'importance d'une conception architecturale durable capable de répondre aux exigences du confort tout en limitant les impacts écologiques. À travers cette formation, l'étudiant sera amené à maîtriser les différentes approches d'analyse du bâtiment, les méthodes d'évaluation des performances énergétiques ainsi que les outils numériques de simulation et de diagnostic.

Afin d'atteindre ces objectifs pédagogiques, le présent cours est structuré en trois chapitres complémentaires et progressifs.

Le premier chapitre regroupe les notions fondamentales et les généralités relatives au confort dans le bâtiment. Il aborde les principaux types de confort recherchés dans les espaces architecturaux, à savoir le confort thermique, le confort visuel, le confort acoustique ainsi que le confort olfactif. Ce chapitre permet à l'étudiant de comprendre les différents phénomènes physiques influençant la sensation de confort ou d'inconfort chez les occupants. Les paramètres climatiques et environnementaux tels que la température, l'humidité relative, la vitesse de l'air, l'éclairage naturel, les nuisances sonores ou encore la qualité de l'air intérieur y sont étudiés de manière détaillée. Une attention particulière est également accordée à l'impact des caractéristiques architecturales et constructives sur le comportement thermique et environnemental des bâtiments.

Le deuxième chapitre a pour objectif principal l'étude des méthodes de calcul et d'évaluation du confort ainsi que de la consommation énergétique dans l'espace architectural. Ce chapitre est organisé en plusieurs parties complémentaires. Dans une première partie, les notions de développement durable, de qualité environnementale et de performance énergétique sont présentées afin de situer les enjeux actuels de la conception durable. Les évolutions technologiques, les réglementations énergétiques et environnementales ainsi que les normes relatives à la performance des bâtiments sont également abordées.

La deuxième partie de ce chapitre traite des différentes méthodes d'évaluation et de mesure du confort dans le bâtiment. Plusieurs approches y sont développées, notamment les mesures in situ, les méthodes de calcul simplifiées et empiriques, les indices de confort thermique, les simulations numériques ainsi que l'utilisation des modèles réduits. Cette partie permet aux étudiants de comprendre les outils et techniques utilisés pour analyser les performances environnementales des bâtiments et évaluer le niveau de satisfaction des occupants.

Dans la dernière partie du deuxième chapitre, l'accent est mis sur les méthodes de diagnostic énergétique des bâtiments. Les principales techniques d'analyse des consommations énergétiques y sont présentées, telles que les méthodes de mesure des consommations, les indices de dépense énergétique, les signatures énergétiques ainsi que la méthode H-M. Cette partie permet d'identifier les sources de déperditions énergétiques et de proposer des solutions d'amélioration visant à réduire les consommations tout en garantissant un niveau de confort adéquat.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude approfondie des outils de simulation et de modélisation appliqués au domaine du bâtiment. Ce chapitre présente les principaux logiciels spécialisés utilisés pour l'évaluation des performances thermiques, énergétiques et environnementales. Concernant le confort thermique et la consommation énergétique, plusieurs logiciels sont étudiés, notamment PLEIADES COMFIE, EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r et Dymola. Ces outils permettent de calculer les déperditions thermiques, d'analyser les besoins énergétiques et de simuler le comportement thermique dynamique des bâtiments.

Le chapitre aborde également les logiciels dédiés à l'étude de l'éclairage naturel et du confort visuel, tels qu'Ecotect, Dialux, Relux, IES VE et Radiance. Ces outils permettent d'évaluer la qualité de l'éclairage intérieur, les niveaux d'éclairement ainsi que les performances lumineuses des espaces architecturaux. Enfin, une dernière partie est consacrée aux logiciels de simulation acoustique et d'analyse des nuisances sonores, parmi lesquels AcouBAT, MithraSound, Ecotect

et CadnaR. Ces logiciels facilitent l'évaluation du niveau sonore dans les bâtiments et l'analyse des performances acoustiques des matériaux et des espaces.

Ainsi, ce cours offre aux étudiants une formation complète et multidisciplinaire sur les problématiques du confort dans le bâtiment et du diagnostic énergétique. Il constitue une base essentielle pour comprendre les enjeux de l'architecture durable et maîtriser les outils modernes d'évaluation et de simulation des performances environnementales du cadre bâti.

# **CHAPITRE I**

## **I LE CONFORT DANS LE BATIMENT**

*Le confort dans le bâtiment constitue aujourd'hui un enjeu majeur de l'architecture contemporaine. Il ne se limite plus uniquement à la protection contre les conditions climatiques, mais englobe également le bien-être thermique, visuel, acoustique et psychologique des occupants. À travers une conception adaptée aux besoins humains et aux exigences environnementales, l'architecture cherche à créer des espaces à la fois fonctionnels, agréables et économes en énergie.*

# I.1 LE CONFORT HYGROTHERMIQUE

## Introduction

Le confort dans le bâtiment représente aujourd'hui l'un des principaux défis de l'architecture contemporaine. Il ne se limite pas uniquement à offrir un abri ou une protection contre les conditions climatiques extérieures, mais vise également à assurer le bien-être global des occupants à travers plusieurs dimensions : le confort thermique, acoustique, visuel et même psychologique. Dans un contexte marqué par les changements climatiques, l'augmentation des besoins énergétiques et l'évolution des modes de vie, l'architecte est appelé à concevoir des espaces capables de répondre aux exigences de qualité de vie tout en respectant les principes du développement durable. Ainsi, la conception architecturale joue un rôle essentiel dans la création d'environnements intérieurs sains, agréables et adaptés aux besoins humains. Le choix des matériaux, l'orientation du bâtiment, l'éclairage naturel, la ventilation, ainsi que l'intégration des technologies modernes, sont autant d'éléments qui influencent directement le niveau de confort des usagers. Le bâtiment devient alors un espace de vie pensé pour favoriser la santé, la productivité et le bien-être, tout en réduisant la consommation énergétique et l'impact environnemental.

### 1.1.1. Le métabolisme de l'homme, (M)

Selon l'American Society of Heating, le métabolisme (M), également appelé thermogénèse ou puissance métabolique, correspond à la quantité de chaleur produite par le corps humain à la suite des réactions chimiques liées à la transformation des aliments en énergie. Ce processus biologique constitue la principale source de chaleur interne de l'organisme et joue un rôle fondamental dans le maintien des fonctions vitales. Afin d'assurer un équilibre thermique stable, cette chaleur doit être continuellement évacuée vers l'environnement extérieur. Le corps humain cherche ainsi à maintenir une température interne constante, indispensable au bon fonctionnement des organes et des systèmes physiologiques. La production de chaleur métabolique dépend principalement du niveau d'activité physique de l'individu. En situation de repos, le métabolisme peut être relativement faible, alors qu'il augmente considérablement lors d'un effort physique important. Chez un adulte, cette puissance thermique peut varier approximativement entre 70 et 900 W. Une partie de l'énergie produite au niveau des muscles et du centre du corps est utilisée pour réaliser un travail mécanique (W), comme les mouvements et les activités physiques. Cependant, la plus grande partie de cette énergie reste sous forme de chaleur. Cette quantité de chaleur résiduelle, appelée métabolisme net ( $M_{net} = M - W$ ), doit être dissipée afin d'éviter une élévation excessive de la température corporelle. Le transfert de chaleur à l'intérieur du corps humain s'effectue grâce à plusieurs mécanismes physiologiques. La chaleur produite au niveau des organes internes et des muscles est transportée vers la surface du corps par conduction à travers les tissus biologiques et par convection sanguine via la circulation du sang. Une fois arrivée à la peau, cette chaleur est ensuite échangée avec l'environnement extérieur par différents modes de transfert thermique tels que la convection, le rayonnement, la conduction et l'évaporation. Pour assurer ses fonctions vitales dans des conditions environnementales très variées, l'être humain doit maintenir sa température interne autour de  $(37,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ . Cette capacité d'autorégulation thermique est remarquable, surtout lorsque l'on considère que la température de l'environnement terrestre peut varier globalement de  $-50 ^\circ\text{C}$  à  $+50 ^\circ\text{C}$ . Le corps humain dispose donc de mécanismes complexes de thermorégulation qui lui permettent de s'adapter aux différentes conditions climatiques tout en préservant son équilibre thermique et son confort physiologique.

### 1.1.2. Transfert thermique du corps humain

Les transferts thermiques, également appelés phénomènes de thermolyse, correspondent aux échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement extérieur. Ces échanges sont essentiels pour maintenir l'équilibre thermique de l'organisme et assurer une température interne stable. Ils s'effectuent à travers l'ensemble des mécanismes classiques de transfert de chaleur, principalement au niveau de la peau, mais également par les voies respiratoires. Le corps humain échange continuellement de la chaleur avec son environnement par différents processus physiques. L'évapotranspiration, qui comprend l'évaporation de la sueur à la surface de la peau ainsi que l'humidité rejetée par la respiration, constitue un mécanisme très important de dissipation thermique, particulièrement dans les environnements chauds. La conduction permet le transfert de chaleur par contact direct entre le corps et une surface ou un matériau. La convection, quant à elle, correspond aux échanges thermiques entre la peau et l'air ambiant en mouvement. Enfin, le rayonnement thermique représente les échanges de chaleur sous forme d'ondes infrarouges entre le corps humain et les surfaces environnantes.

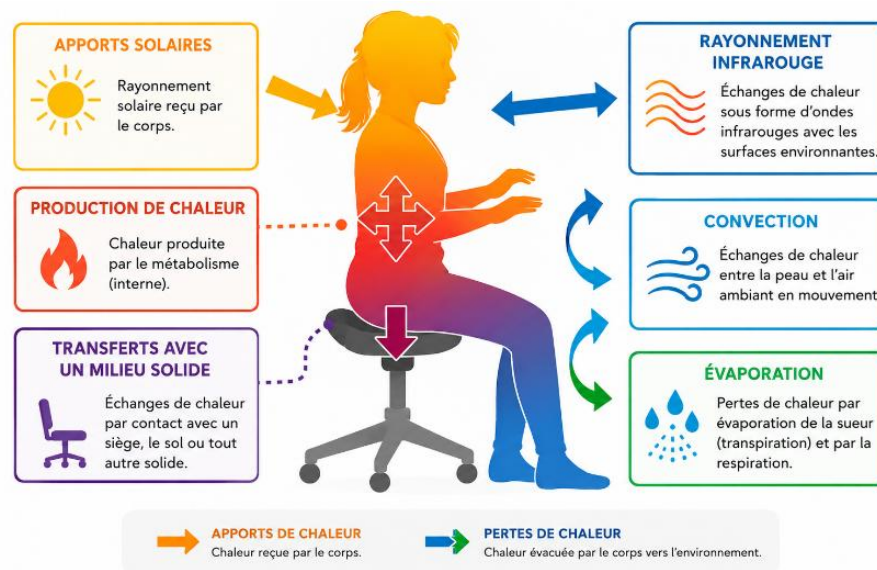


**Figure 1.** Transferts thermiques du corps humain

(Thellier et al., 2011)

Dans des conditions climatiques normales ou froides, ces mécanismes entraînent généralement des pertes de chaleur permettant au corps de maintenir son équilibre thermique. Cependant, dans une ambiance chaude, certains de ces échanges peuvent s'inverser et devenir des apports thermiques. Par exemple, lorsque la température de l'air ou des surfaces environnantes dépasse celle de la peau, le corps reçoit de la chaleur par convection ou rayonnement, ce qui augmente la sensation d'inconfort thermique et sollicite davantage les mécanismes de régulation

physiologique, notamment la transpiration. Ainsi, l'équilibre thermique du corps humain dépend de la relation entre la chaleur produite par le métabolisme interne et la chaleur échangée avec l'environnement extérieur. La maîtrise de ces phénomènes est particulièrement importante dans le domaine du bâtiment et de l'architecture, car les conditions thermiques des espaces intérieurs influencent directement le confort, la santé et le bien-être des occupants.

### 1.1.3. Bilan thermique du corps humain

Le bilan thermique du corps humain peut être calculé par la formule suivante (1) :

$$C_h \frac{dT_h}{dt} = M_{net} + Ray_{sol} - Evap \pm Conv \pm Ray_{ir} \pm Kond \quad (1)$$

Où :

- Rayonnement Solaire (Raysol).
- Evaporation (Evap) cutanée et respiratoire.
- Convection (Conv) cutanée et respiratoire.
- Rayonnement Infra rouge (RayIR).
- Conduction avec un milieu solide (Kond).

### 1.1.4. Bilan thermique global d'un habitat/ bâtiment

Le bilan thermique global d'un bâtiment est la somme des apports internes, liés au dégagement de chaleur interne (Pint), de la production des systèmes de génie climatique (Pgc), les transferts à travers l'enveloppe composé de mur, fenêtre, toiture, etc. ( $\Phi_{env}$ )\*, des transferts aérauliques liés au renouvellement d'air ( $\Phi_{air}$ )\* comme infiltration, ventilation, etc et enfin les apports solaires à travers les vitrages ( $\Phi_{sol}$ ). Le bilan thermique global se calcule par la formule (2).

$$C_h \frac{dT_h}{dt} = P_{int} \pm P_{gc} + \Phi_{sol} \pm \Phi_{env} \pm \Phi_{air} \quad (2)$$

Enfin, les apports solaires, notés ( $\Phi_{sol}$ ), représentent la chaleur apportée par le rayonnement solaire à travers les surfaces vitrées. Ces gains thermiques peuvent être bénéfiques en période hivernale en réduisant les besoins de chauffage, mais ils peuvent également provoquer une surchauffe en été si la conception bioclimatique et les protections solaires ne sont pas adaptées. Ainsi, le bilan thermique global d'un bâtiment résulte de l'interaction entre l'ensemble de ces paramètres. Il peut être exprimé par une relation générale traduisant l'équilibre entre les apports et les pertes thermiques du bâtiment. Le calcul de ce bilan permet d'optimiser la performance énergétique, d'améliorer le confort thermique des occupants et de concevoir des bâtiments plus durables et économes en énergie

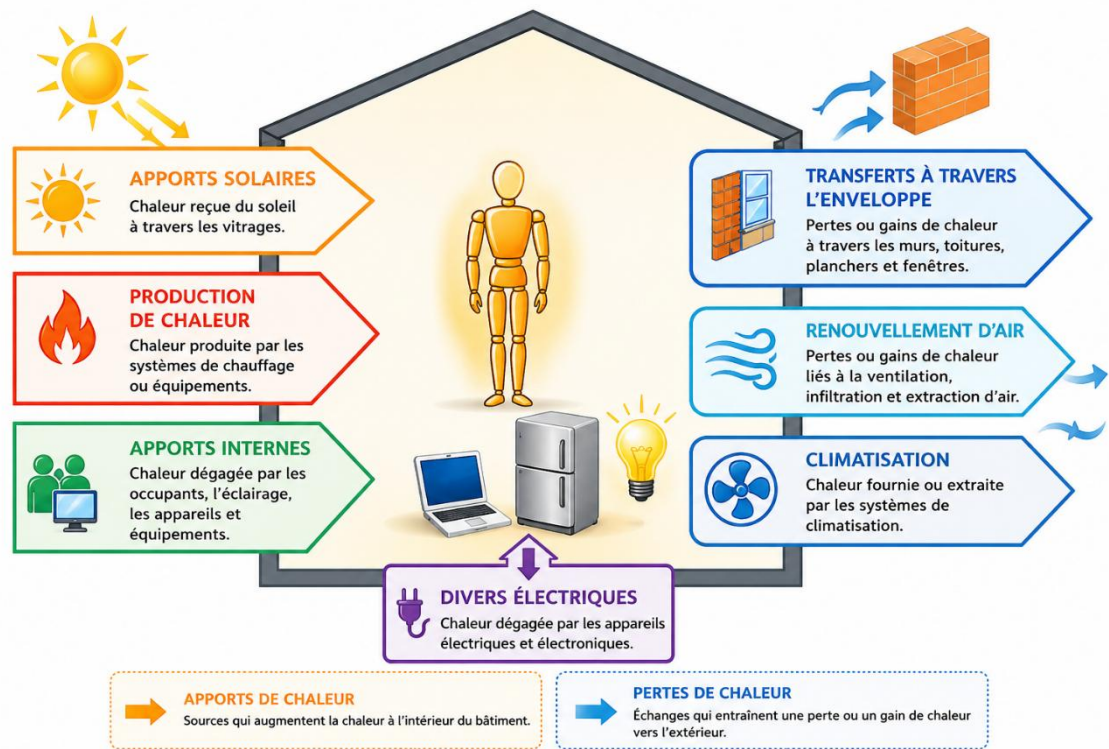


Figure 2. Transferts thermiques dans un bâtiment (Thellier al., 2011)

### 1.1.5. Bilan thermique global (Homme et Habitat)

Le bilan thermique global est la somme du bilan thermique de l'homme et celui de du bâtiment

et qui se calcul par la formule suivante (3) :  $C \times \frac{dT_h}{dt} = Prod + \Phi_{in} - \Phi_{out}$  (3)

Ou : C est la Capacité thermique totale (J/°C), T est la Température moyenne du système (°C), T représente le Temps (s), Prod représente la Puissance produite (W) et  $\Phi$  est le Flux de chaleur échangé (W), in : entrant ; out : sortant.

### 1.1.6. Paramètres influant sur le confort hygrothermique

Différents paramètres et facteurs permettent d'évaluer la sensation thermique d'une personne vis-à-vis de son environnement intérieur, ainsi que son niveau de confort hygrothermique. Ces paramètres influencent directement les échanges de chaleur entre le corps humain et l'ambiance environnante, et déterminent ainsi la perception de confort ou d'inconfort thermique ressentie par les occupants. Leur étude est essentielle dans le domaine du bâtiment afin de concevoir des espaces intérieurs adaptés aux besoins physiologiques et au bien-être des usagers.

Les principaux paramètres pris en compte sont le métabolisme, incluant le niveau d'activité physique de la personne, la température de l'air ambiant, la température des parois environnantes, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent ou de l'air intérieur, ainsi que l'habillement. L'interaction entre ces différents facteurs conditionne l'équilibre thermique du corps humain et joue un rôle fondamental dans l'évaluation du confort thermique à l'intérieur des bâtiments.

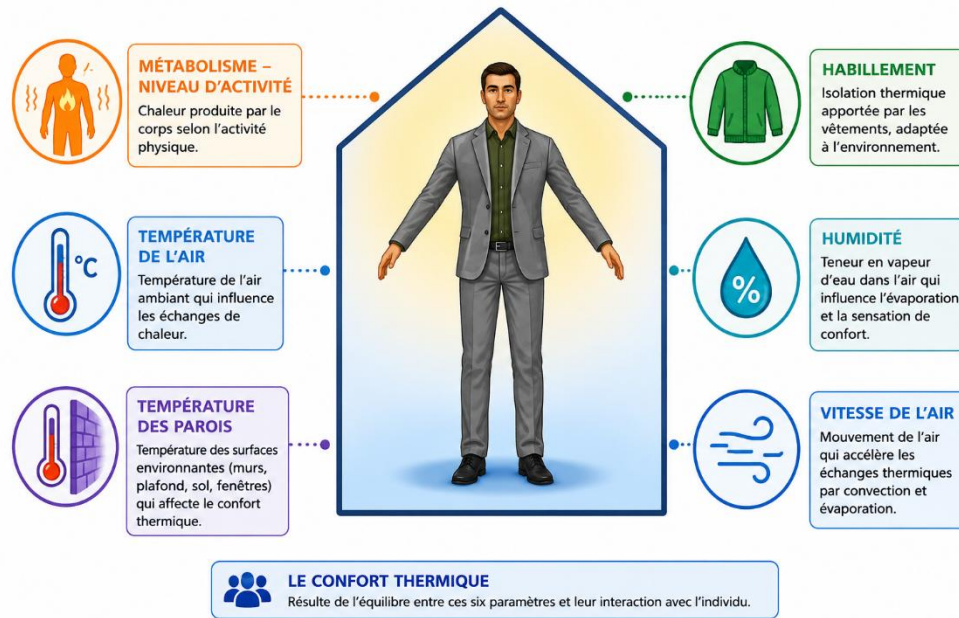


**Figure 3.** Les paramètres du confort hygrothermique  
(Confort hygrothermique et réduction des consommations d'énergie, 2014)

Le confort hygrothermique vise à créer des conditions ambiantes favorables au bien-être des occupants en limitant les réactions physiologiques de thermorégulation du corps humain, telles que la transpiration excessive, les frissonnements ou encore les sensations de chaleur et de froid. Il représente un élément essentiel dans la qualité des espaces intérieurs, puisqu'il influence directement la santé, le confort et les performances des usagers au sein des bâtiments. Pour assurer un bon niveau de confort hygrothermique, plusieurs paramètres doivent être pris en considération dès la phase de conception architecturale. L'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment joue un rôle fondamental, notamment à travers l'orientation du bâtiment par rapport au soleil, les dimensions des ouvertures et les dispositifs de protection solaire des parois vitrées. À cela s'ajoutent la maîtrise de la ventilation naturelle ou mécanique, ainsi que le recours éventuel à des systèmes passifs ou actifs de chauffage et de refroidissement. Une régulation efficace des équipements thermiques permet également d'optimiser les conditions intérieures tout en réduisant les consommations énergétiques et en améliorant la performance environnementale du bâtiment. Le choix des matériaux de construction et leur capacité d'inertie thermique participent

également au maintien d'une température intérieure stable tout au long de la journée. De plus, la prise en compte des conditions climatiques locales permet d'adapter les solutions architecturales aux spécificités de chaque région

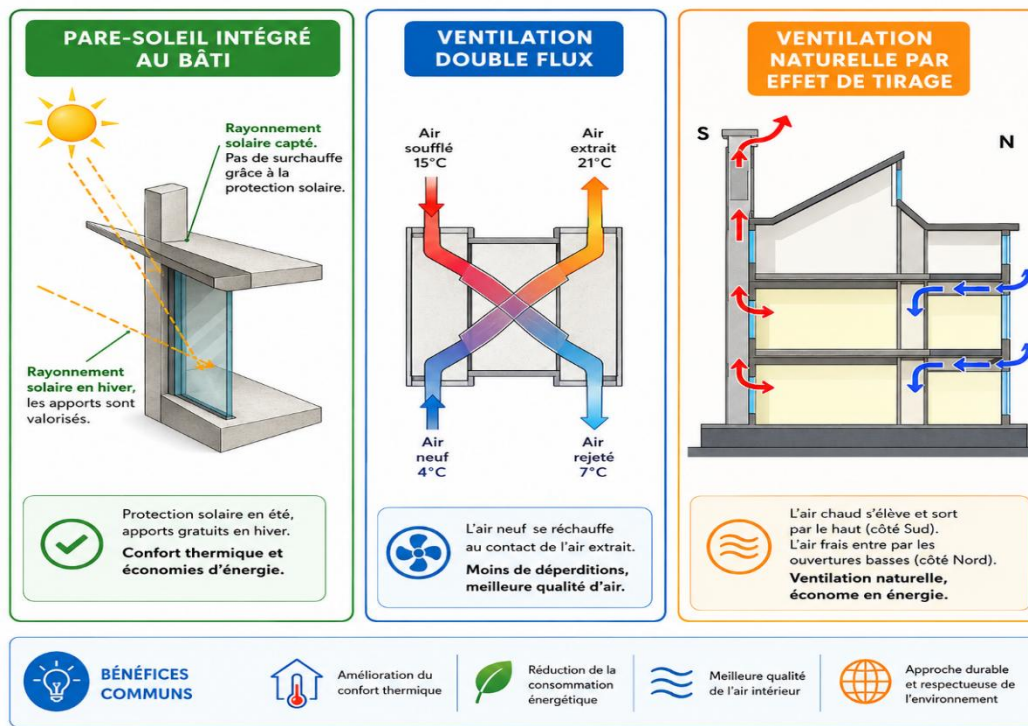


**Figure 4.** *Stratégies pour atténuer le confort hygrothermique*  
(Confort hygrothermique et réduction des consommations d'énergie, 2014)

Le confort hygrothermique peut être assuré grâce à une meilleure prise en compte des conditions de confort, notamment durant la période estivale où les risques de surchauffe sont plus importants. Il repose sur une étude approfondie des zones de confort thermique ainsi que sur la recherche d'une homogénéité des ambiances hygrothermiques à l'intérieur des espaces bâtis. L'objectif est de garantir des conditions intérieures stables et agréables pour les occupants, tout en limitant les variations excessives de température et d'humidité. L'atteinte de ce confort dépend également du choix approprié des équipements techniques, tels que les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, qui doivent être adaptés aux caractéristiques du bâtiment et aux conditions climatiques locales. Une conception architecturale bioclimatique, associée à une bonne isolation thermique et à une ventilation efficace, permet aussi d'améliorer considérablement les performances hygrothermiques des bâtiments. Par ailleurs, l'utilisation de protections solaires, de matériaux à forte inertie thermique et de dispositifs de ventilation naturelle contribue à réduire les besoins énergétiques et à améliorer le confort intérieur. La

maîtrise des apports solaires et des échanges thermiques avec l'extérieur joue également un rôle essentiel dans la prévention des phénomènes d'inconfort thermique. Ainsi, le confort hygrothermique constitue aujourd'hui un enjeu majeur dans la conception des bâtiments durables, économes en énergie et respectueux du bien-être des occupants.

#### **1.1.6.1. Meilleure prise en compte du confort d'été**

Une meilleure prise en compte du confort d'été permet de limiter considérablement les risques de surchauffe et de maintenir une température intérieure agréable dans l'ensemble des espaces d'un bâtiment durant la période estivale. Cet objectif est devenu essentiel dans la conception architecturale contemporaine, notamment face à l'augmentation des températures et aux enjeux liés à la maîtrise de la consommation énergétique. Le confort thermique en été dépend de plusieurs stratégies passives et actives visant à réduire les apports de chaleur et à améliorer les conditions de vie des occupants. La maîtrise du facteur solaire constitue l'un des principaux moyens pour atteindre cet objectif, notamment à travers une bonne orientation du bâtiment et une prise en compte adaptée des caractéristiques du site. Le recours à une isolation thermique performante permet également de limiter les échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur. L'inertie thermique des matériaux joue un rôle fondamental, car plus la masse du bâtiment est importante, plus les transferts thermiques sont ralentis et décalés dans le temps, ce qui contribue à stabiliser la température intérieure. Par ailleurs, l'utilisation de dispositifs de protection solaire, tels que les brise-soleil, les débords de toiture ou les écrans végétaux, permet de réduire l'exposition directe au rayonnement solaire tout en favorisant l'éclairage naturel. Une ventilation naturelle efficace peut aussi améliorer le rafraîchissement des espaces intérieurs, particulièrement durant la nuit. Enfin, le recours à la climatisation peut être envisagé dans certaines situations, à condition qu'il soit raisonné et optimisé afin de limiter les consommations énergétiques et les impacts environnementaux.

#### **1.1.6.2. Zone de confort hygrothermique**

Le diagramme bioclimatique est élaboré à partir du diagramme psychrométrique, qui constitue un outil graphique permettant d'analyser les relations entre la température de l'air, l'humidité et les conditions de confort hygrothermique. Il offre une représentation visuelle des différentes zones de confort thermique et des stratégies architecturales ou techniques pouvant être utilisées pour améliorer les conditions ambiantes à l'intérieur des bâtiments. Cet outil est particulièrement important dans la conception bioclimatique, car il aide à adapter le bâtiment aux caractéristiques

climatiques locales tout en réduisant les besoins énergétiques. Le diagramme met en évidence la zone de confort hygrothermique correspondant aux conditions dans lesquelles les occupants ressentent une sensation de bien-être thermique sans recours important aux systèmes mécaniques de chauffage ou de climatisation. Il représente également l'extension de cette zone de confort grâce à l'effet de la ventilation naturelle ou mécanique, qui permet d'améliorer les échanges thermiques et de réduire les sensations d'inconfort en période chaude. Par ailleurs, le diagramme bioclimatique illustre les zones où les conditions hygrothermiques peuvent être compensées par l'inertie thermique du bâtiment, associée à des protections solaires efficaces et à l'utilisation de matériaux ou d'enduits clairs capables de limiter l'absorption du rayonnement solaire. Il identifie aussi les situations où des systèmes passifs de refroidissement par évaporation peuvent contribuer à améliorer le confort intérieur, notamment dans les régions chaudes et sèches.

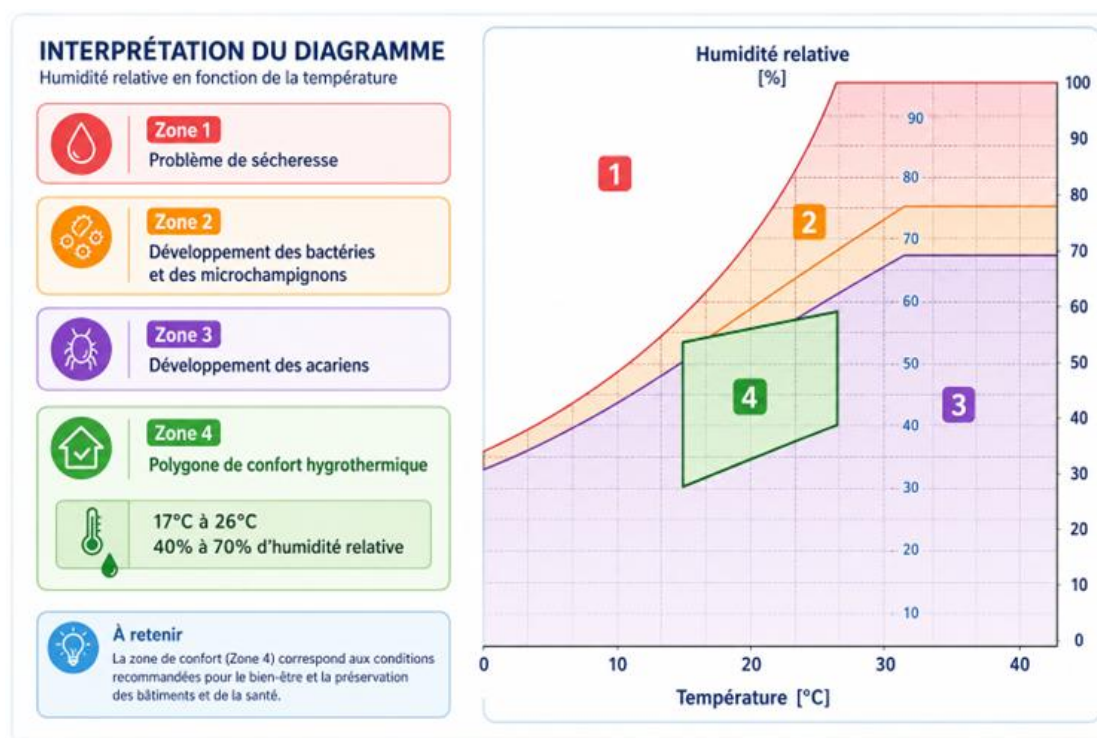


**Figure 5.** Diagramme bioclimatique  
(Confort hygrothermique et réduction des consommations d'énergie, 2014)

L'homogénéité des ambiances hygrothermiques peut être assurée par l'implantation et l'orientation des vitrages, l'inertie et l'isolation thermique des bâtiments qui favorisent à la fois le bien-être des personnes et les économies d'énergie grâce aux matériaux qui emmagasinent et restituent petit à petit la chaleur ou la fraîcheur, permettant un réchauffement ou un refroidissement progressif.

De plus, la sensation de confort en été, en hiver, en mi saison doit être la même, la différence de température de bas en haut du corps et le courant d'air ou effets de paroi froide, ...).



**Figure 6.** L'homogénéité des ambiances hygrothermiques  
(<https://www.maison-passive-eco.com>)

#### 1.1.6.3. Le choix des équipements

Parmi les différents modes de chauffage disponibles, le chauffage par rayonnement est souvent privilégié par rapport au chauffage par convection. En effet, ce système diffuse la chaleur de manière plus uniforme dans les locaux et procure une sensation de confort plus naturelle. Cette répartition homogène réduit les écarts de température entre les différentes parties du corps, particulièrement entre la tête et les pieds, évitant ainsi les sensations d'inconfort thermique fréquemment ressenties dans les espaces mal chauffés. À l'inverse, une mauvaise distribution de la chaleur peut entraîner des zones froides ou surchauffées et affecter négativement le bien-être des occupants. En outre, un système de chauffage performant contribue à réduire les pertes thermiques et à optimiser la consommation énergétique du bâtiment. Une gestion efficace de l'énergie permet non seulement de diminuer les coûts liés au chauffage, mais également de limiter l'impact environnemental du bâtiment. L'intégration d'une isolation thermique performante renforce davantage cette efficacité en empêchant les déperditions de chaleur vers l'extérieur. De plus, l'utilisation de matériaux adaptés et de techniques constructives modernes améliore la conservation de la chaleur à l'intérieur des espaces. Par ailleurs, les systèmes de régulation thermique, tels que les thermostats intelligents et les programmeurs automatiques, jouent un rôle essentiel dans la maîtrise de la température intérieure. Ces dispositifs permettent d'adapter le fonctionnement du chauffage selon les besoins réels des occupants et les périodes

d'utilisation des locaux. Cette gestion intelligente favorise une meilleure performance énergétique tout en garantissant un niveau de confort constant. Elle contribue également à éviter les consommations excessives d'énergie et à prolonger la durée de vie des équipements de chauffage.

Enfin, le recours aux énergies renouvelables et aux solutions énergétiques durables constitue aujourd'hui une orientation importante dans la conception des bâtiments modernes. L'utilisation de pompes à chaleur, de panneaux solaires thermiques ou de systèmes hybrides permet de renforcer l'efficacité énergétique globale du bâtiment. Une bonne qualité de l'air intérieur, associée à un chauffage adapté et à une ventilation efficace, participe également au confort et à la santé des occupants. Ainsi, le choix d'un système de chauffage performant s'inscrit dans une démarche globale visant à assurer le confort thermique, l'économie d'énergie et la durabilité environnementale des bâtiments.

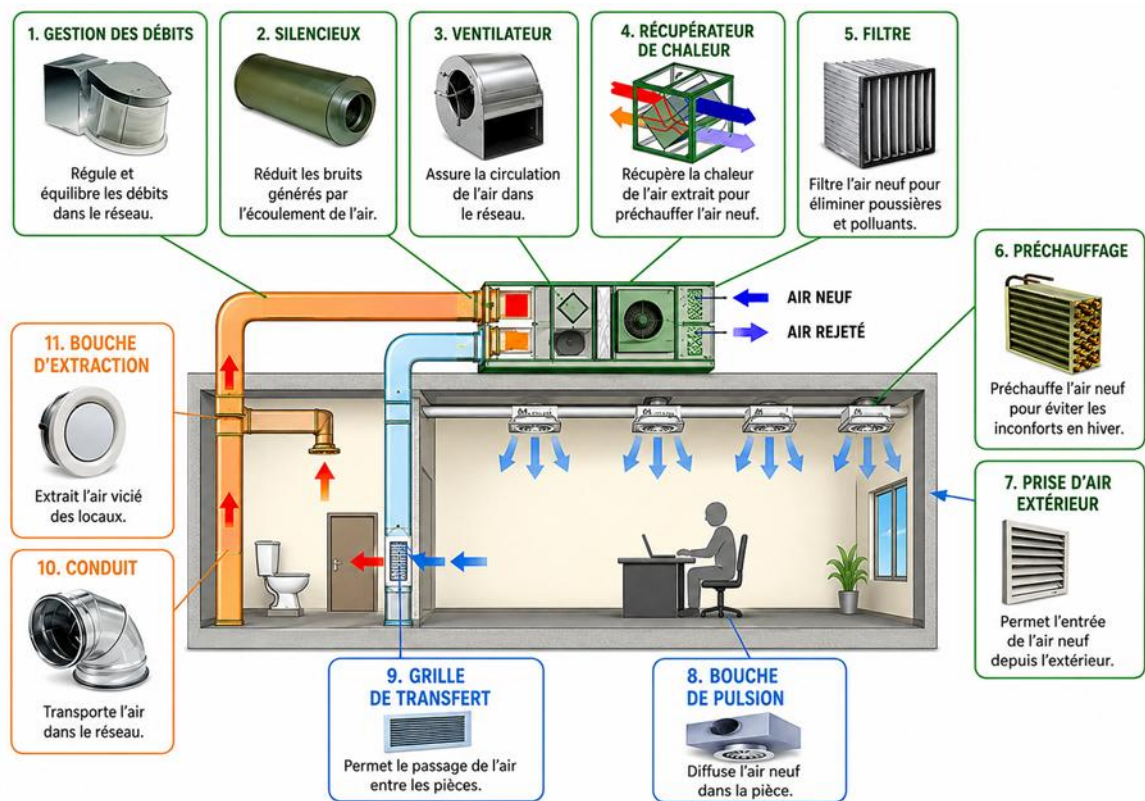


Figure 7. Le choix des équipements (<https://energieplus-lesite.be>)



## Introduction

Le confort visuel peut être défini comme l'ensemble des conditions permettant d'assurer une perception agréable et efficace de l'environnement lumineux, tout en garantissant le bien-être des occupants. Il correspond à une relation visuelle harmonieuse avec l'espace intérieur et extérieur grâce à un éclairage adapté aux besoins des utilisateurs. Ce confort repose à la fois sur l'optimisation de l'éclairage naturel, afin de réduire les consommations énergétiques, et sur l'utilisation d'un éclairage artificiel performant servant de complément lorsque la lumière du jour est insuffisante. De manière générale, le confort visuel constitue une sensation subjective directement liée à la qualité, à l'intensité et à la répartition de la lumière dans un espace. Il dépend également de plusieurs facteurs, tels que l'absence d'éblouissement, le rendu des couleurs, les contrastes lumineux et l'adaptation de l'éclairage aux activités pratiquées. Un environnement visuel confortable permet de distinguer clairement les objets et les détails sans provoquer de fatigue oculaire ni d'inconfort. Par ailleurs, un bon confort visuel contribue à améliorer la concentration, la productivité et le bien-être psychologique des occupants. Une ambiance lumineuse équilibrée et agréable favorise également une meilleure perception des volumes, des couleurs et des matériaux architecturaux. Ainsi, la maîtrise de l'éclairage naturel et artificiel représente un élément essentiel dans la conception des espaces intérieurs confortables, fonctionnels et économes en énergie.

### **1.2.1. La perception de la lumière**

Le processus de la vision repose sur une interaction complexe et quasi simultanée entre les yeux et le cerveau, via un réseau de neurones, de récepteurs et de cellules spécialisées. Il débute lorsque la lumière atteint l'œil et stimule les photorécepteurs situés dans la rétine. Ces cellules transforment ensuite le signal lumineux en impulsions électriques, codant ainsi l'information visuelle. Ces signaux sont ensuite transmis par le nerf optique vers différentes zones de traitement intermédiaires du cerveau. L'information visuelle est progressivement analysée, triée et interprétée avant d'atteindre le cortex visuel, situé dans la partie occipitale du cerveau, où se construit la perception finale de l'image. La perception visuelle correspond donc à un phénomène neurophysiologique complexe impliquant une conversion photochimique de la lumière en signal nerveux. Ce mécanisme repose sur une interaction entre les ondes électromagnétiques et les récepteurs rétiniens, entraînant des réactions bioélectriques qui permettent de transformer un stimulus lumineux en image perçue. Ainsi, la vision ne se limite pas à l'œil seul, mais résulte d'un traitement global et coordonné entre les organes sensoriels et le système nerveux central, garantissant une interprétation cohérente et précise de l'environnement visuel.

### **1.2.2. Le champ visuel**

Le champ visuel correspond à la portion de l'espace que l'œil peut percevoir sans effectuer de mouvement de la tête. Il s'agit d'une capacité sensorielle essentielle qui permet à l'individu de s'orienter et d'analyser son environnement de manière globale. Ce champ varie légèrement selon les individus en fonction de facteurs anatomiques et physiologiques. Dans le sens vertical, le champ visuel s'étend en moyenne jusqu'à environ 130°. Cette extension est naturellement limitée par les structures du visage, notamment les arcades sourcilières vers le haut et les joues vers le bas. Ces limites jouent un rôle de protection, mais influencent également la perception des objets situés en périphérie verticale. Dans le sens horizontal, le champ visuel atteint approximativement 180° lorsque le regard est fixé sur un point immobile. Cette amplitude permet une large perception latérale de l'environnement, utile pour détecter les mouvements et les objets situés sur les côtés. Chaque œil, considéré individuellement, possède un champ visuel d'environ 150°, ce qui montre que la vision humaine repose sur une large couverture spatiale même en monoculaire. Cependant, la vision la plus efficace est obtenue par la coordination des deux yeux. En effet, les champs visuels des deux yeux se superposent partiellement dans la région centrale. Cette zone de recouvrement permet la vision binoculaire, où un même objet est perçu simultanément par les deux yeux sous des angles légèrement différents. Ce phénomène est

fondamental pour la perception du relief, de la profondeur et des distances. Ainsi, le champ visuel constitue un élément essentiel du système visuel humain, assurant à la fois une perception large de l'environnement et une analyse fine des objets situés dans l'axe du regard.

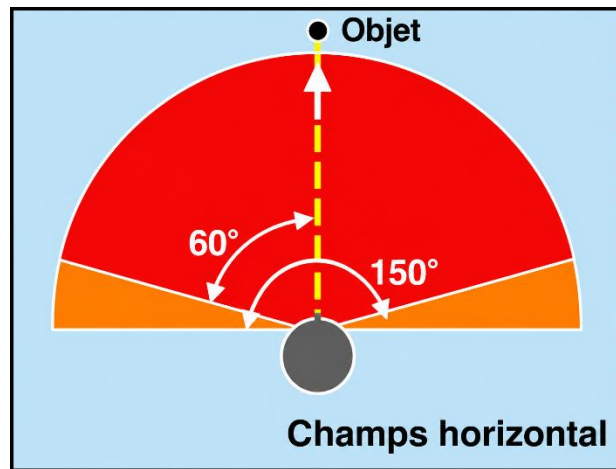


**Figure 8.** Le champ visuel (Bodart et Deneyer, 2008)

Le champ visuel peut également être défini comme étant la capacité de l'œil à saisir une information visuelle. La fovéa : est un champ visuel assez restreint de 2° qui nous permet de percevoir les détails et plus nous nous éloignons de ce champ central, plus les détails sont difficilement perceptibles. L'ergonoma : est un champ visuel de 30° par rapport à l'axe de vue et il nous permet de distinguer les formes. Le panorama : est un champ visuel de 60° par rapport à l'axe de vue qui nous permet de distinguer les mouvements.

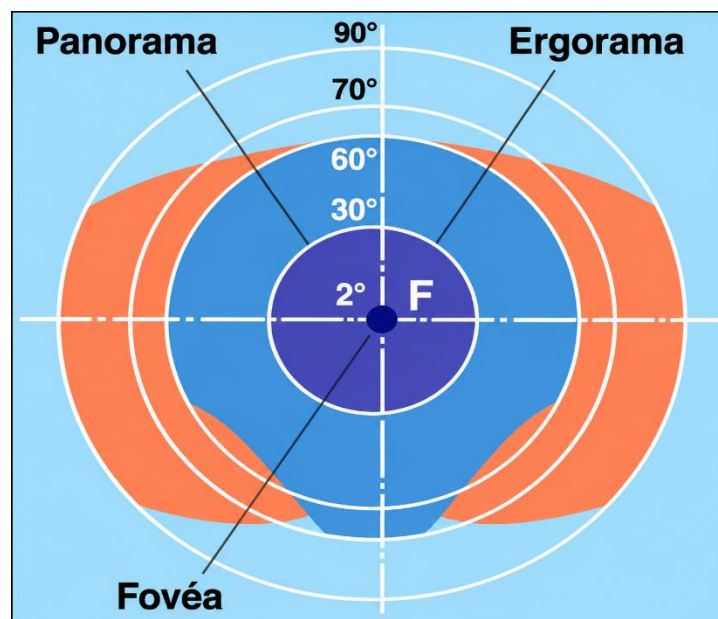


**Figure 9.** Le champ visuel (Bodart et Deneyer, 2008)

### 1.2.3. La perception des couleurs

La perception des couleurs est étroitement liée à la nature de la lumière qui éclaire les objets. En effet, un même objet peut apparaître sous des teintes différentes selon la qualité et la composition de la lumière reçue. Les couleurs dites froides, comme le bleu, sont riches en radiations bleues, tandis que les couleurs chaudes, comme le rouge ou l'orange, contiennent davantage de radiations rouges. Cette distinction influence non seulement notre perception visuelle, mais également les sensations psychologiques et thermiques ressenties dans un espace architectural ou intérieur. L'œil humain ne perçoit pas toutes les couleurs avec la même intensité. Il possède une sensibilité particulière à certaines longueurs d'onde lumineuses. Ainsi, les teintes jaunes et vertes sont généralement perçues avec plus de netteté, alors que les couleurs bleues et rouges sont moins facilement distinguées. Cette perception différenciée s'explique par la structure même du système visuel humain, notamment par la composition de la rétine. La rétine est constituée de deux types principaux de cellules photoréceptrices : les cônes et les bâtonnets. Les cônes sont responsables de la vision des couleurs et fonctionnent principalement en présence d'un éclairage suffisant. Ils permettent de distinguer les trois couleurs fondamentales : le rouge, le vert et le bleu. Grâce à leur combinaison, l'être humain peut percevoir une très grande variété de nuances et de tonalités chromatiques. Les bâtonnets, quant à eux, sont beaucoup plus sensibles à la lumière que les cônes, avec une sensibilité pouvant être de 100 à 500 fois supérieure. Ils interviennent principalement dans la vision nocturne ou dans les environnements faiblement éclairés. Cependant, contrairement aux cônes, ils ne permettent pas de distinguer les couleurs avec précision. Leur rôle essentiel est donc d'assurer la perception des formes, des contrastes et des mouvements dans l'obscurité. La lumière possède également une propriété importante appelée facteur de réflexion. Celui-ci correspond au rapport entre la quantité de lumière reçue par une surface et la quantité de lumière qu'elle réfléchit. Ce facteur est généralement exprimé en pourcentage et varie selon la couleur, la texture et la nature des matériaux. Les surfaces claires présentent un facteur de réflexion élevé, car elles renvoient une grande partie de la lumière reçue, tandis que les surfaces foncées absorbent davantage la lumière et réfléchissent moins de rayonnements lumineux.

Dans le domaine de l'architecture et de l'éclairage, la qualité de la lumière est définie par plusieurs paramètres essentiels. Parmi eux figure l'indice de rendu des couleurs (IRC), exprimé en pourcentage. Cet indice mesure la capacité d'une source lumineuse à restituer fidèlement les couleurs réelles des objets éclairés. Plus l'IRC est élevé, plus les couleurs apparaissent naturelles

et proches de la réalité. Une lumière ayant un IRC de 100 offre une restitution parfaite des couleurs. Un autre paramètre fondamental est la température de couleur, mesurée en degrés Kelvin (K). Elle caractérise la teinte générale de la lumière émise par une source lumineuse. Une température de couleur faible produit une lumière chaude, tirant vers le jaune ou l'orangé, créant ainsi une ambiance confortable et apaisante. À l'inverse, une température de couleur élevée génère une lumière froide, plus blanche ou bleutée, souvent associée à une sensation de dynamisme, de concentration et de modernité. Dans les espaces architecturaux, le choix des couleurs et de l'éclairage influence directement le confort visuel des occupants. Une lumière mal adaptée peut provoquer une fatigue oculaire, une diminution de la concentration et même une sensation d'inconfort psychologique. Au contraire, un éclairage bien étudié améliore la qualité des espaces, valorise les matériaux et favorise le bien-être des utilisateurs. Les architectes et les concepteurs accordent donc une grande importance à l'interaction entre la lumière naturelle, la lumière artificielle et les couleurs des surfaces intérieures. Les matériaux réfléchissants, les peintures claires et les ouvertures bien orientées permettent d'optimiser l'éclairage naturel et de réduire la consommation énergétique des bâtiments. La couleur joue également un rôle symbolique et émotionnel dans l'architecture. Les teintes chaudes créent des ambiances accueillantes et conviviales, tandis que les couleurs froides évoquent souvent le calme, la sérénité et la modernité. L'utilisation judicieuse des couleurs contribue ainsi à renforcer l'identité d'un espace et à influencer le comportement des occupants. Par ailleurs, l'évolution des technologies d'éclairage, notamment les systèmes LED, permet aujourd'hui de contrôler précisément la température de couleur et l'intensité lumineuse. Cette maîtrise offre la possibilité d'adapter l'ambiance lumineuse selon les besoins fonctionnels, les activités pratiquées ou les périodes de la journée. Enfin, la lumière constitue un élément fondamental dans la perception architecturale. Elle met en valeur les volumes, souligne les textures, accentue les contrastes et participe à la création d'une atmosphère spécifique. L'association harmonieuse entre lumière et couleur représente donc un enjeu majeur dans la conception des espaces contemporains, tant sur le plan esthétique que fonctionnel et énergétique.

### 1.2.4. La performance visuelle

La performance visuelle est un taux d'évaluation du système visuel utilisé pour quantifier les aptitudes d'une personne à **détecter, identifier et analyser** les détails entrant dans son champ de vision en se fondant sur la vitesse, la précision et la qualité de sa perception. Elle dépend entre autres des caractéristiques propres de la tâche à accomplir, de l'acuité visuelle de l'observateur,

de la nature de l'arrière-plan, des conditions d'éclairage,...etc. La visibilité du détail dépend de : sa dimension angulaire et de sa forme, sa luminance et sa couleur, son contraste par rapport au fond immédiat, sa position dans le panorama visuel, la luminance d'adaptation, l'âge de l'observateur, le temps d'observation, etc...

### **1.2.5. Les critères du confort visuel**

La performance visuelle représente un indicateur permettant d'évaluer l'efficacité du système visuel humain. Elle sert à mesurer la capacité d'une personne à détecter, reconnaître, distinguer et analyser les différents détails présents dans son champ de vision. Cette évaluation repose principalement sur plusieurs critères essentiels tels que la rapidité de perception, la précision de l'observation ainsi que la qualité de l'interprétation visuelle. En d'autres termes, la performance visuelle traduit l'aptitude de l'œil et du cerveau à traiter correctement les informations visuelles dans des conditions données. Cette performance dépend de nombreux facteurs liés aussi bien à l'environnement qu'aux capacités physiologiques de l'observateur. Parmi les éléments les plus importants figurent les caractéristiques de la tâche visuelle à accomplir. Une tâche nécessitant une grande précision, comme la lecture de petits caractères, le dessin technique ou les travaux de conception architecturale, exige une performance visuelle plus élevée qu'une activité simple d'observation générale. L'acuité visuelle de l'observateur constitue également un facteur déterminant. Elle correspond à la capacité de l'œil à distinguer clairement les détails fins et les contours des objets. Une bonne acuité visuelle améliore considérablement la qualité de perception et facilite l'identification rapide des éléments observés. À l'inverse, une déficience visuelle peut réduire la capacité de concentration, augmenter la fatigue oculaire et diminuer l'efficacité du travail visuel. La nature de l'arrière-plan joue aussi un rôle important dans la perception visuelle. Un objet est plus facilement visible lorsqu'il se détache clairement de son environnement grâce à un contraste suffisant. Par exemple, un texte noir sur fond blanc offre une meilleure lisibilité qu'un texte gris sur fond sombre. Le contraste entre l'objet observé et son arrière-plan influence donc directement la qualité de la vision et le confort visuel. Les conditions d'éclairage représentent un autre élément fondamental de la performance visuelle. Une lumière insuffisante, excessive ou mal répartie peut provoquer une fatigue visuelle, une diminution de la concentration et des difficultés de perception. Un éclairage adapté permet au contraire d'améliorer la visibilité des détails, de réduire les erreurs d'observation et d'augmenter le confort des utilisateurs. C'est pourquoi la qualité de l'éclairage naturel et artificiel constitue une préoccupation essentielle dans les domaines de l'architecture, du design et de l'ergonomie. La

visibilité d'un détail dépend également de plusieurs paramètres visuels spécifiques. Parmi eux figure la dimension angulaire de l'objet, c'est-à-dire sa taille apparente par rapport à la distance de l'observateur. Plus un objet apparaît grand dans le champ visuel, plus il est facilement perceptible. La forme de l'objet influence aussi sa reconnaissance, certaines formes étant plus rapidement identifiables que d'autres. La luminance et la couleur jouent également un rôle essentiel dans la perception des détails. Une surface fortement lumineuse attire davantage l'attention et améliore la visibilité. De même, certaines couleurs sont perçues plus facilement par l'œil humain selon les conditions d'éclairage et le contraste environnant. Le contraste constitue l'un des facteurs les plus importants de la visibilité. Il correspond à la différence de luminance ou de couleur entre un objet et son fond immédiat. Plus ce contraste est élevé, plus l'objet devient visible et identifiable rapidement. À l'inverse, un faible contraste rend la perception difficile et augmente l'effort visuel. La position de l'objet dans le panorama visuel influence également la qualité de perception. Les détails situés au centre du champ visuel sont généralement mieux perçus que ceux placés en périphérie. La luminance d'adaptation de l'œil, c'est-à-dire sa capacité à s'adapter à différents niveaux d'éclairage, intervient aussi dans la performance visuelle. Enfin, d'autres facteurs comme l'âge de l'observateur, le temps d'observation et l'état de fatigue influencent fortement la perception visuelle. Avec l'âge, les capacités d'adaptation de l'œil diminuent progressivement, nécessitant souvent un éclairage plus important pour assurer un confort visuel satisfaisant. Ainsi, la performance visuelle résulte d'une interaction complexe entre les caractéristiques humaines, les conditions environnementales et la qualité de l'éclairage.

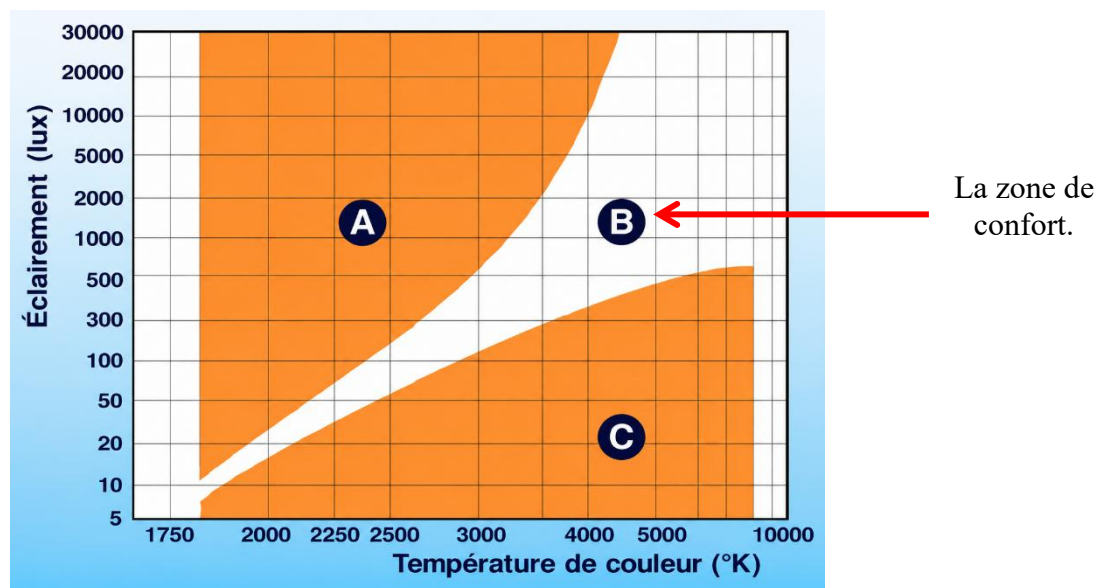


**Figure 10.** Le diagramme de Kruithof (Suzel Balez, 2008/2009)

Le confort visuel peut néanmoins se mesurer à travers des critères objectifs qui doivent être bien étudiés pour atteindre le seuil du confort : Le site, avec toutes ses contraintes Le nombre d'ouvertures, leur taille, leur orientation. La quantité de lumière naturelle. La qualité de l'éclairage naturel. La qualité de l'éclairage électrique en termes de confort et de dépenses énergétiques. La relation visuelle avec l'extérieur. -La qualité de l'éclairage électrique en termes de confort et de dépenses énergétiques.

### 1.2.6. Les paramètres du confort visuel

Le confort visuel peut néanmoins se mesurer à travers des critères objectifs qui doivent être bien étudiés pour atteindre le seuil du confort : Le site, avec toutes ses contraintes Le nombre d'ouvertures, leur taille, leur orientation. La quantité de lumière naturelle. La qualité de l'éclairage naturel. La qualité de l'éclairage électrique en termes de confort et de dépenses énergétiques. La relation visuelle avec l'extérieur. -La qualité de l'éclairage électrique en termes de confort et de dépenses énergétiques

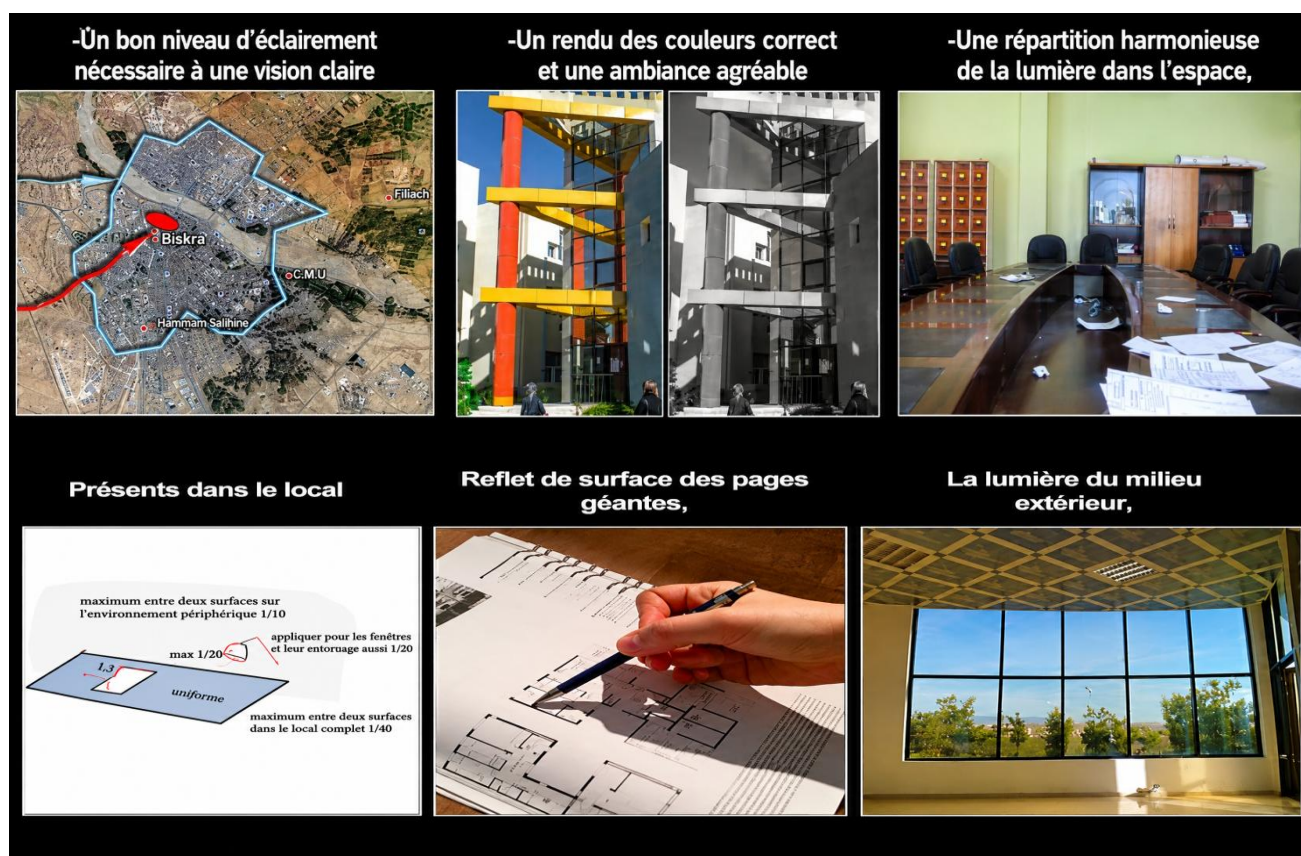


Figure 11. Les paramètres du confort visuel (Daich, 2011)

### 1.6.2.1. Un bon niveau d'éclairage

Chaque activité humaine nécessite un niveau d'éclairage adapté à la nature de la tâche effectuée ainsi qu'aux besoins visuels des utilisateurs. En effet, la qualité de l'éclairage joue un rôle essentiel dans le confort visuel, la précision du travail et le bien-être des occupants d'un espace. La zone dans laquelle se déroule une activité doit donc bénéficier d'un éclairage suffisant afin de permettre une perception claire des objets, des formes, des couleurs et des détails. D'une manière générale, plus une tâche visuelle est complexe ou exigeante, plus le niveau d'éclairage nécessaire doit être élevé. Les activités nécessitant une grande précision, comme la lecture, le dessin technique, les travaux de laboratoire, les activités médicales ou les opérations de contrôle minutieux, demandent un éclairage plus intense que les espaces de circulation ou les zones de repos. Un bon niveau d'éclairage améliore la concentration, réduit les erreurs et augmente l'efficacité visuelle des utilisateurs. Un niveau minimal d'éclairage est indispensable pour assurer une vision nette, confortable et sans fatigue. Lorsque l'éclairage est insuffisant, l'œil doit fournir un effort supplémentaire pour distinguer les détails, ce qui provoque rapidement une fatigue visuelle, des maux de tête et une diminution des performances. À long terme, un mauvais éclairage peut également entraîner une sensation d'inconfort et affecter la qualité du travail réalisé.

Cependant, un éclairage excessif peut lui aussi devenir gênant et inconfortable. Une lumière trop intense risque de provoquer des phénomènes d'éblouissement, de réflexion excessive ou de contraste trop important entre les surfaces. Cela peut perturber la perception visuelle, réduire le confort des occupants et entraîner une fatigue oculaire. L'objectif d'un bon éclairage n'est donc pas uniquement d'augmenter la quantité de lumière, mais surtout de trouver un équilibre adapté aux besoins visuels de chaque activité. L'éclairage moyen recommandé dans un espace est généralement déterminé en fonction de la fonctionnalité du local ainsi que du degré de précision des tâches visuelles qui y sont exercées. Ainsi, les bureaux, les salles de classe, les ateliers, les bibliothèques ou les espaces industriels possèdent chacun des exigences spécifiques en matière d'éclairage. Les normes et recommandations techniques définissent souvent des valeurs minimales d'éclairage afin de garantir des conditions visuelles satisfaisantes pour les utilisateurs. Dans les études d'éclairage, les recommandations sont le plus souvent exprimées en termes d'éclairage plutôt qu'en termes de luminance. Cela s'explique par le fait que l'éclairage est plus facile à mesurer à l'aide d'appareils spécialisés tels que le luxmètre. Il représente la quantité de lumière reçue par une surface et s'exprime en lux. Toutefois, la sensation

réelle de luminosité perçue par l'œil humain est davantage liée à la luminance, c'est-à-dire à la quantité de lumière réfléchiée par une surface dans une direction donnée. La luminance dépend directement des propriétés des matériaux, des couleurs et des textures des surfaces éclairées. Ainsi, deux surfaces recevant le même éclairement peuvent apparaître différemment selon leur capacité à réfléchir la lumière.

#### **1.6.2.2. Un rendu des couleurs correct et une lumière agréable**

Les différentes radiations colorées qui composent la lumière naturelle deviennent visibles lors des phénomènes de réfraction et de réflexion à travers les gouttes d'eau, comme dans le cas de l'arc-en-ciel. Ce phénomène démontre que la lumière blanche du soleil est en réalité constituée d'un ensemble de couleurs correspondant aux différentes longueurs d'onde du spectre lumineux. Chaque radiation possède des caractéristiques propres qui influencent directement la perception visuelle des objets et des espaces. L'œil humain est naturellement adapté à la lumière du jour, car celle-ci représente la référence fondamentale du système visuel. Pour cette raison, les sources lumineuses artificielles devraient reproduire autant que possible la composition spectrale de la lumière naturelle émise par le soleil et le ciel. Cette similitude est essentielle afin de garantir une perception fidèle des couleurs et d'éviter toute altération visuelle. Une source lumineuse mal équilibrée peut modifier l'apparence réelle des objets, déformer certaines teintes et réduire la qualité du confort visuel. Le système visuel humain fonctionne en regroupant les différentes radiations lumineuses réfléchies par les objets afin de produire une sensation de couleur. Ainsi, la couleur perçue ne dépend pas uniquement de l'objet lui-même, mais également de la nature du spectre lumineux qui l'éclaire. Un même objet peut donc apparaître différemment selon le type de lumière utilisé, qu'il s'agisse d'une lumière naturelle, chaude ou froide. La perception des couleurs est fortement influencée par la température de couleur de la source lumineuse. Les objets présentant des couleurs chaudes, comme le rouge, l'orange ou le jaune, apparaissent généralement plus agréables et plus harmonieux lorsqu'ils sont éclairés par une lumière chaude. Ce type d'éclairage crée une ambiance conviviale, apaisante et confortable, souvent recherchée dans les espaces résidentiels, les hôtels ou les lieux de détente. À l'inverse, une lumière froide met davantage en valeur les couleurs froides telles que le bleu, le vert ou le violet. Elle produit une atmosphère plus dynamique, plus neutre et parfois plus stimulante. Ce type d'éclairage est souvent utilisé dans les bureaux, les espaces de travail, les établissements de santé ou les environnements nécessitant une forte concentration visuelle. Dans le domaine architectural et de la décoration intérieure, le choix des couleurs joue un rôle essentiel dans la perception des

dimensions et des volumes d'un espace. Les couleurs chaudes ont tendance à rapprocher visuellement les surfaces et à créer une sensation d'intimité et de chaleur. Elles sont donc généralement recommandées pour les grands espaces ou les locaux de dimensions importantes afin de les rendre plus accueillants et plus confortables. Les couleurs froides, en revanche, produisent un effet d'éloignement visuel. Elles donnent une impression d'ouverture, de légèreté et d'agrandissement des espaces. C'est pourquoi elles sont souvent privilégiées dans les petits locaux ou les espaces réduits afin de créer une sensation de profondeur et d'augmentation des dimensions apparentes.

#### **1.6.2.3. Une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace**

Afin d'assurer une bonne diffusion de la lumière naturelle à l'intérieur d'un espace, il est indispensable d'organiser l'aménagement intérieur de manière réfléchie et fonctionnelle. La disposition du mobilier, des équipements et des zones d'activité influence directement la qualité de l'éclairage ainsi que le confort visuel des occupants. Un mauvais agencement peut empêcher la lumière de pénétrer correctement dans le local et créer des zones d'ombre ou des contrastes gênants. Pour favoriser une répartition optimale de la lumière naturelle, le mobilier doit être placé de façon à ne pas constituer un obstacle à la propagation des rayons lumineux. Les éléments volumineux, tels que les armoires, les cloisons ou les étagères hautes, ne doivent pas être positionnés devant les ouvertures, car ils risquent de bloquer la lumière et de réduire l'éclairement des espaces intérieurs. Une organisation spatiale adaptée permet au contraire de faciliter la circulation de la lumière dans l'ensemble du local. Les zones destinées aux activités nécessitant une attention visuelle importante doivent être implantées de manière judicieuse par rapport aux ouvertures. Les plans de travail, les bureaux, les tables de lecture ou les espaces de dessin seront de préférence situés à proximité des fenêtres ou des ouvertures recevant directement la lumière naturelle. Cette disposition permet de bénéficier d'un éclairage plus efficace, plus confortable et plus économique en réduisant le recours à l'éclairage artificiel pendant la journée.

La qualité de l'éclairage intérieur dépend également de l'uniformité de la luminance et de la manière dont la lumière est répartie dans l'espace. Une bonne uniformité lumineuse évite les contrastes excessifs entre les différentes zones du local et contribue à améliorer le confort visuel des utilisateurs. À l'inverse, des variations importantes de luminance peuvent provoquer une fatigue oculaire, une diminution de la concentration et une sensation d'inconfort. L'uniformité de la luminance est fortement influencée par la disposition des sources lumineuses ainsi que par les propriétés réfléchissantes des parois intérieures. Les murs, les plafonds et les sols jouent un

rôle essentiel dans la diffusion de la lumière grâce à leur capacité à réfléchir les rayonnements lumineux. Plus les surfaces possèdent un coefficient de réflexion élevé, plus elles contribuent à répartir la lumière de manière homogène dans l'espace. Les couleurs claires et les matériaux réfléchissants améliorent considérablement la diffusion lumineuse. Les murs peints en blanc ou dans des teintes claires réfléchissent davantage la lumière naturelle et artificielle, ce qui permet d'augmenter la sensation de luminosité et de réduire les zones sombres. En revanche, les surfaces foncées absorbent une grande partie de la lumière et diminuent l'uniformité de l'éclairage intérieur. L'uniformité de luminance doit être assurée à plusieurs niveaux. D'une part, il est nécessaire de maintenir un équilibre visuel entre le champ de vision en situation de travail, comme le plan de travail ou le bureau, et les zones de repos visuel telles que les murs ou les plafonds. Des écarts trop importants de luminance entre ces surfaces obligent l'œil à effectuer des adaptations constantes, ce qui augmente la fatigue visuelle.

### **1.6.2.4. Les rapports de luminance présents dans le local**

La distribution lumineuse à l'intérieur d'un espace doit être étudiée avec soin afin d'assurer un confort visuel optimal aux occupants. Un éclairage bien réparti permet de créer des conditions favorables à la perception des formes, des couleurs et des détails, tout en réduisant la fatigue oculaire. À l'inverse, une mauvaise répartition de la lumière peut engendrer des différences excessives de luminance entre les différentes zones d'un local, provoquant ainsi une sensation d'inconfort et des difficultés visuelles. Dans un espace intérieur, il est important d'éviter la présence de zones extrêmement sombres ou, au contraire, de surfaces trop brillantes. Des écarts importants de luminance obligent l'œil humain à s'adapter continuellement aux variations d'éclairage, ce qui entraîne une fatigue visuelle et réduit la qualité de perception. Une distribution lumineuse équilibrée permet donc de maintenir une vision stable, confortable et efficace. Le contraste constitue un élément fondamental de la perception visuelle. Il correspond à la différence de luminosité existant entre un objet et son environnement immédiat, ou encore entre différentes parties d'un même objet. Grâce au contraste, certains éléments deviennent plus visibles et se distinguent plus facilement du fond sur lequel ils apparaissent. La perception des détails d'une tâche visuelle dépend fortement des contrastes de luminance et de couleur entre les objets observés et leur arrière-plan. Un contraste adéquat améliore la lisibilité, facilite l'identification des formes et augmente la précision visuelle. Par exemple, un texte noir sur fond blanc offre une meilleure visibilité qu'un texte gris sur fond sombre. Dans les espaces de travail, les salles de

classe, les bureaux ou les ateliers, un contraste bien maîtrisé contribue à améliorer les performances visuelles et le confort des utilisateurs.

Cependant, des contrastes trop importants peuvent devenir gênants et provoquer un inconfort visuel. Une grande différence de luminance dans le champ visuel entraîne une adaptation constante de l'œil entre les zones claires et les zones sombres. Cette situation peut causer une fatigue oculaire, une baisse de concentration, des éblouissements et parfois même des maux de tête. C'est pourquoi il est essentiel de limiter les écarts excessifs de luminance dans la conception de l'éclairage intérieur. Afin d'assurer un bon équilibre lumineux, des valeurs maximales recommandées pour les rapports de luminance ont été établies. Ces rapports permettent de contrôler les différences de luminosité entre les différentes zones du champ visuel et de garantir des conditions visuelles confortables. Ainsi, le rapport de luminance entre l'arrière-plan de la tâche visuelle et son entourage immédiat ne devrait pas dépasser 1/3. Cela signifie que la différence de luminosité entre la zone de travail et les surfaces voisines doit rester modérée afin de limiter les efforts d'adaptation visuelle. Les valeurs maximales recommandées pour les rapports de luminances sont les suivantes :

- Arrière-fond de la tâche visuelle/entourage, 1/3.
- Arrière-fond de la tâche visuelle/champ visuel (180°), 1/10.
- Sources lumineuses/surfaces contiguës, 1/20.
- Pour l'ensemble de l'espace intérieur, 1/40.

Il convient donc de ne pas dépasser certaines valeurs de contraste entre les différentes zones du champ visuel

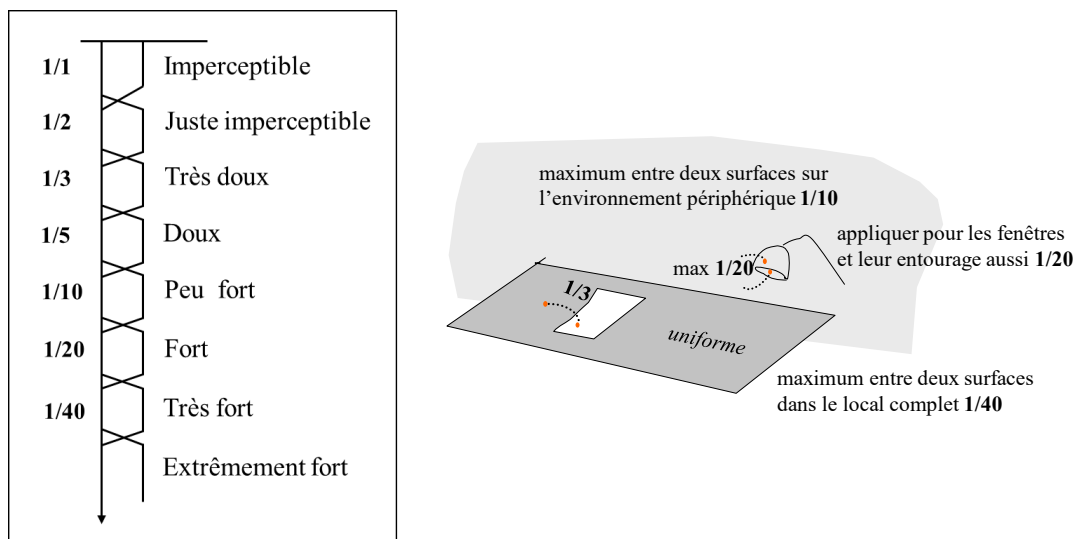


**Figure 12.** Rapports de luminance présents dans le local : à gauche, Les sensations relatives aux différents niveaux de contraste ; à droite, Valeurs recommandées pour le contraste (Mudri, 2008)

#### 1.6.2.5. L'absence d'ombres gênantes

Lorsqu'un objet opaque est exposé à une source lumineuse, il empêche une partie des rayons lumineux de se propager derrière lui. Les zones privées de lumière qui apparaissent à la suite de cette obstruction constituent ce que l'on appelle l'ombre. Ainsi, l'ombre se forme chaque fois qu'un élément se trouve entre une source de lumière et une surface éclairée. Ce phénomène est directement lié à la propagation rectiligne de la lumière. Dans les espaces architecturaux, les ombres jouent un rôle essentiel dans la perception des volumes, des formes et des profondeurs. Elles participent à la mise en valeur des reliefs, à la création d'ambiances et à la compréhension visuelle des espaces. Cependant, des ombres excessives ou mal maîtrisées peuvent également provoquer une gêne visuelle, réduire la visibilité et altérer le confort des occupants. L'ombre produite par un objet éclairé se compose généralement de deux zones distinctes : l'ombre propre et l'ombre portée. Chacune de ces zones possède des caractéristiques particulières liées à la position de la source lumineuse et à la surface recevant l'ombre. La première zone correspond à l'ombre propre. Elle est située sur la partie de l'objet opposée à la source lumineuse. Cette zone ne reçoit pas directement les rayons lumineux et apparaît donc plus sombre que les parties éclairées de l'objet. L'ombre propre permet de révéler le volume, la forme et la texture de l'objet grâce au contraste entre les surfaces éclairées et les surfaces obscures. Elle joue un rôle fondamental dans la perception tridimensionnelle des formes. La seconde zone est appelée ombre portée. Elle correspond à la projection de l'objet sur une surface située derrière lui, comme un mur, un sol, un écran ou toute autre surface réceptrice. Cette région ne reçoit pas directement les rayons lumineux, car ceux-ci sont bloqués par l'objet opaque. L'ombre portée varie selon plusieurs paramètres, notamment la position de la source lumineuse, l'orientation de l'objet, la distance entre l'objet et la surface de projection, ainsi que l'intensité de la lumière. Dans le domaine de l'architecture, les ombres portées constituent un élément important de la composition spatiale et esthétique. Elles permettent de créer des effets de profondeur, de rythme et de mouvement sur les façades et les espaces intérieurs. Les architectes utilisent souvent les jeux d'ombre et de lumière pour mettre en valeur certaines formes architecturales, accentuer des textures ou produire des ambiances particulières au cours de la journée. La qualité des ombres dépend également de la nature de la source lumineuse. Une source ponctuelle produit généralement des ombres nettes et bien définies, tandis qu'une source lumineuse diffuse génère des ombres plus douces et moins marquées. La lumière naturelle, en raison des variations de la position du soleil, modifie continuellement la forme et l'intensité des ombres au fil des heures et des saisons. Les ombres ont aussi une fonction climatique et environnementale importante. Dans

les régions chaudes, elles permettent de protéger les espaces intérieurs et extérieurs contre l'excès de rayonnement solaire, contribuant ainsi à améliorer le confort thermique et à réduire les besoins en climatisation. Les dispositifs architecturaux tels que les brise-soleil, les auvents, les pergolas et les avancées de toiture sont spécialement conçus pour contrôler les ombres et limiter les surchauffes. Cependant, un excès d'ombre peut entraîner une diminution de l'éclairage naturel et créer des zones sombres inconfortables. Il est donc nécessaire d'étudier soigneusement l'orientation des bâtiments, la taille des ouvertures et la disposition des éléments architecturaux afin d'obtenir un équilibre harmonieux entre lumière et ombre. Ainsi, l'ombre constitue un phénomène fondamental dans la perception visuelle et dans la conception architecturale. Elle ne représente pas simplement une absence de lumière, mais un élément essentiel de la composition spatiale, du confort visuel et de la qualité esthétique des espaces construits.

### **1.6.2.6. La relation au monde extérieur**

Les baies vitrées, par lesquelles la lumière pénètre, offrent le double avantage d'une communication visuelle vers l'extérieur et d'une vue au loin nécessaire au repos de l'œil après une vision rapprochée. Elles jouent aussi un rôle esthétique indéniable car elles font participer les paysages extérieurs à l'ambiance visuelle d'un espace déterminé. C'est l'éclairage naturel et l'accès aux vues qui constituent les aspects les plus importants dans l'atteinte de la satisfaction d'un employé par rapport à son espace de travail. Les paysages visibles à travers les ouvertures influencent directement la perception de l'espace intérieur. Une vue dégagée sur un jardin, un paysage naturel ou un horizon lointain peut créer une sensation d'ouverture, de calme et de liberté. À l'inverse, un espace fermé sans accès visuel vers l'extérieur peut générer une impression d'enfermement et d'inconfort psychologique. Dans les espaces de travail, l'éclairage naturel et l'accès aux vues extérieures représentent des facteurs essentiels de satisfaction et de bien-être des employés. De nombreuses études montrent que les travailleurs bénéficiant d'un bon éclairage naturel et d'une vue agréable sont généralement plus motivés, plus productifs et moins sujets au stress et à la fatigue. La lumière naturelle améliore également la concentration, la qualité du travail et le rythme biologique des occupants. L'accès visuel vers l'extérieur contribue aussi à réduire la sensation de monotonie dans les environnements professionnels.



## I-3 LE CONFORT ACOUSTIQUE

### Introduction

L'acoustique architecturale a pour principal objectif d'assurer une qualité sonore adaptée aux différents espaces d'écoute et d'usage. Elle vise à créer des environnements où les sons peuvent être perçus de manière claire, agréable et équilibrée, en tenant compte de la fonction de chaque lieu. Cette discipline concerne aussi bien les salles de spectacles, telles que les opéras, les théâtres et les cinémas, que les espaces publics comme les gymnases, les piscines, les gares ou les aéroports. Le confort acoustique correspond à l'ensemble des conditions sonores permettant aux occupants de bénéficier d'un environnement agréable et fonctionnel. Il repose, d'une part, sur une écoute satisfaisante des sons produits à l'intérieur d'un espace, et d'autre part, sur la limitation des nuisances sonores provenant de l'extérieur ou des équipements techniques du bâtiment. un bon confort acoustique implique la maîtrise des bruits extérieurs, des bruits de choc, des vibrations ainsi que des sons générés par les installations techniques telles que la ventilation, la climatisation ou les équipements mécaniques. L'objectif est de réduire les gênes sonores afin d'améliorer le bien-être, la concentration et la qualité d'usage des espaces architecturaux.

### 1.3.1. Rappel des notions de base

Le son pur correspond à une vibration qui se propage à travers un milieu élastique tel que l'air, l'eau ou les matériaux solides. Cette vibration résulte d'un mouvement oscillatoire capable de transmettre une énergie sonore perceptible par l'oreille humaine. Le son est caractérisé par plusieurs paramètres physiques fondamentaux, notamment la fréquence, l'amplitude et la durée. La fréquence représente le nombre de vibrations effectuées par seconde et s'exprime en Hertz (Hz). Elle détermine la hauteur du son perçu, c'est-à-dire si le son est grave ou aigu. Plus la fréquence est élevée, plus le son paraît aigu ; à l'inverse, une faible fréquence produit un son grave. L'amplitude correspond à l'intensité de la vibration sonore. Elle détermine le niveau sonore ou le volume du son perçu par l'oreille. Une amplitude importante produit un son fort, tandis qu'une faible amplitude génère un son plus faible. La durée représente le temps pendant lequel le son est émis et perçu. Elle permet de distinguer les sons brefs des sons prolongés.

En fonction de leur fréquence, les sons peuvent être classés en trois grandes catégories distinctes . 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)
- Le son se mesure en décibels (dB), unité de mesure logarithmique, ce qui implique que :

L'addition de deux sources sonores identiques entraîne une augmentation de 3 dB (50 dB + 50 dB = 53 dB). Une multiplication par 10 de la puissance acoustique entraîne une augmentation de 10 dB. (50 dB x 10 = 60 dB). Si deux bruits ont des niveaux sonores différents d'au moins 10 dB, le plus élevé masque le plus faible, effet de masque. (50 dB + 60 dB = 60 dB).

### 1.3.2. Définition du bruit

Le bruit correspond à une vibration de l'air qui se propage sous forme d'ondes sonores et qui se caractérise principalement par sa fréquence, son intensité et sa durée d'émission. Contrairement au son pur, qui possède une fréquence unique et régulière, le bruit est constitué d'un mélange complexe de nombreux sons de fréquences et d'amplitudes différentes. Cette superposition de vibrations sonores produit une sensation auditive souvent irrégulière et difficile à distinguer clairement. La fréquence du bruit détermine la hauteur des sons qui le composent, tandis que son intensité correspond au niveau sonore perçu par l'oreille humaine. La durée d'émission représente le temps pendant lequel le bruit est produit et entendu. Selon ces caractéristiques, le

bruit peut être continu, intermittent ou impulsif. De manière générale, le bruit est associé à toute sensation sonore perçue comme désagréable, gênante ou indésirable. Il peut perturber les activités humaines, provoquer une fatigue auditive, diminuer la concentration et affecter le confort des occupants dans un espace donné. Les sources de bruit sont nombreuses et variées, comme les avions, les machines industrielles, la circulation routière, les équipements techniques ou encore les conversations et les voix humaines. Dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme, la maîtrise du bruit constitue un enjeu essentiel pour assurer le confort acoustique des espaces intérieurs et extérieurs. Une bonne conception acoustique permet de réduire les nuisances sonores et d'améliorer la qualité de vie des utilisateurs.

### 1.3.3. La propagation du bruit

C'est le chemin parcouru par les ondes émises par la source sonore pour atteindre notre oreille. La vitesse de propagation dépend du lieu dans lequel est émis le son, elle est dans l'air de 340 m/s. Dans un espace acoustiquement ouvert, un bruit ne rencontre pas d'obstacle et son intensité diminue avec l'éloignement de la source sonore. La propagation se fait en champ libre. Dans un environnement construit, un bruit rencontre de nombreux obstacles qui tantôt l'absorbent et tantôt le réfléchissent. Le niveau sonore est pratiquement le même en tous points. La propagation se fait en champ diffus. Il existe trois types de bruit, on trouve les bruits aériens intérieurs et extérieurs (sons qui naissent et se propagent dans l'air) : voix, musique, voitures, avions, etc, les bruits d'impact (sons qui naissent au contact d'un élément constitutif du bâtiment et se propage au travers de celui-ci) : pas, outils, etc. et les bruits générés par les équipements : ventilation, chaudière, etc. Une onde acoustique se caractérise par deux grandeurs : son niveau et sa fréquence et qui sont illustrés dans la figure ci-dessous (Figure 16).

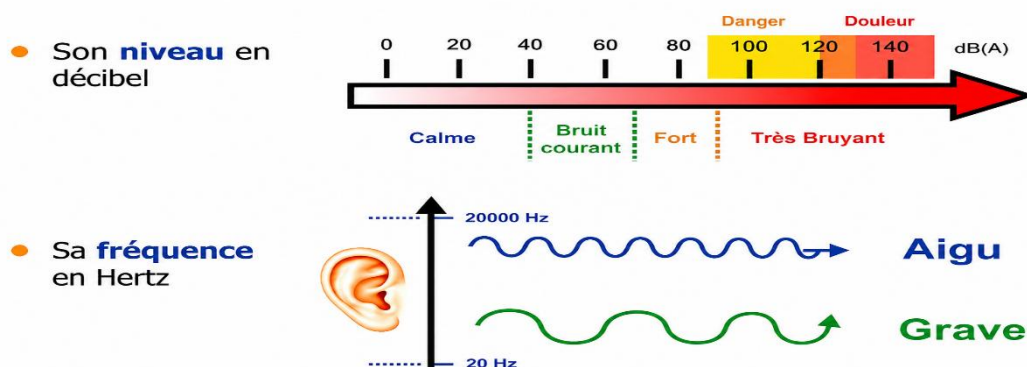


*Figure 13. Les caractéristiques d'une onde acoustique  
(Matthieu, 2016)*

### **1.3.4. Solutions contre le gène acoustique**

Des solutions techniques adaptées doivent compenser les éventuelles nuisances sonores, existantes ou prévisibles, en fonction de l'affectation des locaux. Une analyse de bruit dans l'espace est recommandée afin de localiser des sources sonores extérieures ou intérieures, définir leur type, durée, fréquence, niveau...). Les principales solutions sont les suivantes :

- La correction acoustique a pour but de maîtriser dans un local les réverbérations des bruits émis à l'intérieur
- L'isolation acoustique consiste à obtenir un niveau minimal d'isolement acoustique par rapport aux bruits internes du bâtiment et à son environnement.
- Affaiblir les bruits d'impact et d'équipements : Il convient de traiter la source et la transmission de ces bruits en privilégiant l'emploi de matériaux à forte capacité d'absorption, en désolidarisant les planchers de la structure du bâtiment, en prévoyant des tampons anti-vibratiles entre les équipements de plomberie et les parois...
- Mettre en place un zonage acoustique : Traitement différencié des ambiances acoustiques pour répondre à la variété des activités des usagers, organisation des pièces de façon à créer des espaces tampons avec la source de bruit en tenant compte des activités spécifiques aux locaux...

Pour parvenir à un niveau de confort acoustique satisfaisant à l'intérieur d'un bâtiment, il convient de prendre certaines précautions dès la programmation et la conception car les solutions curatives sont beaucoup plus onéreuses : a) protéger le local des bruits extérieurs (transmissions aériennes, vibrations, ...) après avoir fait l'inventaire et qualifié les sources de nuisances et b) protéger le local des bruits internes du bâtiment (réverbérations, transmissions latérales, ...).

#### **1.3.4.1. La protection contre les bruits extérieurs**

L'implantation et l'orientation d'un bâtiment constituent les premières mesures de protection contre les nuisances sonores extérieures, notamment lorsque les sources de bruit sont clairement identifiées. Une conception architecturale adaptée permet de limiter efficacement la propagation des sons provenant de l'environnement extérieur, tels que le trafic routier, ferroviaire ou aérien, les activités industrielles ou les espaces publics très fréquentés. Dans les opérations comprenant plusieurs bâtiments, certaines constructions peuvent jouer le rôle d'écran acoustique afin de protéger les autres bâtiments des sources de bruit. Cette disposition permet de réduire

l'exposition sonore des espaces les plus sensibles, comme les logements, les bureaux ou les salles de travail. Les bâtiments placés en première ligne absorbent ou dévient une partie des ondes sonores, créant ainsi des zones plus calmes à l'arrière de l'ensemble architectural. Dans le cas d'une opération comportant un seul bâtiment, ou lorsque cette configuration n'est pas réalisable, il est possible d'envisager la mise en place d'écrans acoustiques naturels ou artificiels. Les écrans naturels peuvent être constitués de talus, de plantations d'arbres ou de bandes végétales denses, tandis que les écrans artificiels prennent la forme de murs antibruit, de panneaux acoustiques ou d'aménagements spécifiques destinés à limiter la propagation des sons. Par ailleurs, l'organisation intérieure des espaces peut également contribuer à améliorer le confort acoustique grâce à un zonage fonctionnel adapté. Cette approche consiste à répartir les locaux selon leur niveau de sensibilité au bruit. Les espaces nécessitant le plus de calme, comme les chambres, les bureaux ou les salles de réunion, seront de préférence éloignés des sources sonores, tandis que les espaces moins sensibles, tels que les circulations, les locaux techniques ou les zones de service, pourront être placés dans les zones les plus exposées.

En complément de ces dispositions architecturales, le confort acoustique peut être renforcé par des solutions techniques appliquées aux parois opaques et vitrées. L'isolation acoustique des murs pleins repose généralement sur la mise en œuvre d'un doublage intérieur associé à des matériaux isolants souples et absorbants, tels que les laines minérales ou le polystyrène expansé acoustique (PSE dB). Ces matériaux permettent de réduire la transmission des bruits aériens à travers les parois. Les ouvertures vitrées représentent également un point sensible dans la protection contre les nuisances sonores extérieures. L'amélioration de l'isolation acoustique des fenêtres est souvent assurée par l'utilisation de vitrages composés de deux verres d'épaisseurs différentes. Cette différence d'épaisseur permet de limiter les phénomènes de résonance et d'améliorer l'affaiblissement acoustique. L'étanchéité à l'air entre les menuiseries et les parois joue également un rôle essentiel dans la performance acoustique des ouvertures. Une mauvaise étanchéité favorise les infiltrations sonores et réduit considérablement l'efficacité de l'isolation. Il est donc indispensable d'assurer des liaisons parfaitement étanches entre les fenêtres, les murs et les différents éléments constructifs. la maîtrise du confort acoustique nécessite une approche globale intégrant à la fois des choix architecturaux, urbanistiques et techniques. Une bonne conception acoustique contribue non seulement à réduire les nuisances sonores, mais également à améliorer la qualité de vie, le bien-être et les conditions de travail des occupants des bâtiments.

#### **1.3.4.2. La protection contre les bruits internes**

Les bruits peuvent se propager de différentes manières : soit par voie aérienne, à travers l'air, sous forme de transmission directe ou de réverbération des sons, soit par voie solidienne, à travers les structures du bâtiment, sous forme de vibrations transmises par les parois, les planchers, les conduites ou les équipements techniques. Dans les bâtiments, ces nuisances sonores peuvent fortement affecter le confort et le bien-être des occupants, notamment dans les espaces destinés au repos, au travail ou aux activités quotidiennes. Afin d'assurer un niveau de confort acoustique acceptable, le niveau sonore produit par les équipements techniques ne doit généralement pas dépasser 35 dB dans les pièces principales, telles que les chambres, les salles de séjour ou les bureaux, et 50 dB dans les pièces de service, comme les cuisines, les sanitaires ou les locaux techniques. Le respect de ces seuils permet de limiter les effets négatifs du bruit sur la santé, la concentration et la qualité de vie des usagers. Pour lutter efficacement contre les nuisances sonores, plusieurs solutions préventives et correctives peuvent être mises en œuvre. Il est recommandé de choisir des équipements aussi silencieux que possible, intégrant des technologies réduisant les émissions acoustiques et vibratoires. Par ailleurs, des solutions techniques adaptées doivent être adoptées afin de limiter la propagation des sons et des vibrations à travers le bâtiment. Parmi ces solutions figurent notamment la désolidarisation périphérique des parois, l'utilisation de chapes flottantes, la mise en place de matériaux isolants acoustiques, le traitement des points de transmission vibratoire ainsi que l'amélioration de l'isolation phonique des murs, planchers et plafonds. Ces dispositifs contribuent à améliorer significativement la performance acoustique des bâtiments et le confort des occupants.

#### **1.3.5. La propagation des ondes sonores**

Les ondes sonores émises par une source située à l'intérieur d'une salle se propagent dans l'air dans toutes les directions jusqu'aux limites du volume considéré. Au cours de leur propagation, elles entrent en interaction avec les différentes surfaces et obstacles présents dans l'espace, tels que les murs, les plafonds, les planchers, le mobilier ou encore les équipements techniques. Ces interactions modifient le comportement des ondes acoustiques en fonction des propriétés physiques et géométriques du local. Depuis leur émission jusqu'à leur réception, les ondes sonores obéissent à plusieurs lois physiques liées principalement aux caractéristiques du signal sonore émis — notamment sa fréquence, son intensité et sa longueur d'onde — ainsi qu'aux propriétés des matériaux rencontrés, en particulier leur impédance acoustique, leur capacité d'absorption, de réflexion ou de transmission du son. Ainsi, lorsqu'une onde sonore atteint une

paroi, une partie de l'énergie acoustique peut être réfléchiée, une autre absorbée par le matériau, et une autre encore transmise à travers la structure. La structure du champ acoustique rayonné à l'intérieur d'un espace dépend donc de plusieurs facteurs essentiels qui influencent directement la qualité sonore et le confort acoustique du local. Parmi les principaux facteurs intervenant dans ce phénomène, on peut citer :

- **La source sonore** : sa puissance, sa directivité, sa fréquence et sa position dans la salle influencent fortement la propagation des ondes.
- **Le milieu de propagation** : les caractéristiques de l'air, telles que la température, l'humidité ou la pression atmosphérique, peuvent modifier la vitesse et l'atténuation du son.
- **La nature des parois** : les matériaux constituant les murs, les plafonds et les planchers déterminent les phénomènes de réflexion, d'absorption et de diffusion acoustique.
- **La présence et la nature des obstacles** : le mobilier, les équipements ou les éléments architecturaux influencent la dispersion et la répartition des ondes sonores dans l'espace.

L'ensemble de ces paramètres contribue à définir l'ambiance acoustique d'une salle, ainsi que les performances de confort sonore recherchées dans les bâtiments résidentiels, éducatifs, administratifs ou culturels.

#### 1.3.5.1. La réverbération

La réponse impulsionnelle de la salle peut alors être modélisée comme une séquence obtenue des réflexions parvenant au récepteur, appelée échogramme. Statistiquement, la densité d'échos parvenant au récepteur varie avec le carré du temps.

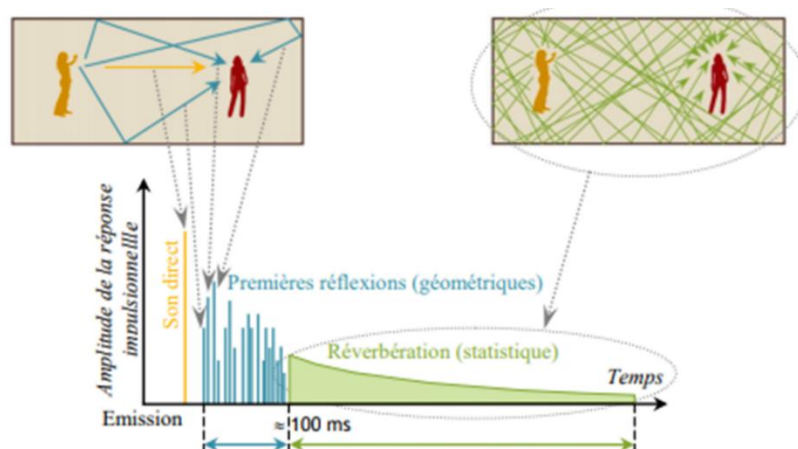


Figure 14. La réverbération dans une salle (Molinaro, 2017)

Une onde sonore lors de sa propagation est soumise à des phénomènes de réflexion, diffraction, diffusion ou absorption par les obstacles rencontrés (sol, murs et plafond, mobilier ...).



**Figure 15.** Le comportement physique d'une onde acoustique dans un auditorium  
(<http://www.uncubemagazine.com>)

L'onde directe et les ondes réfléchies se superposent et contribuent à la qualité du son perçu.

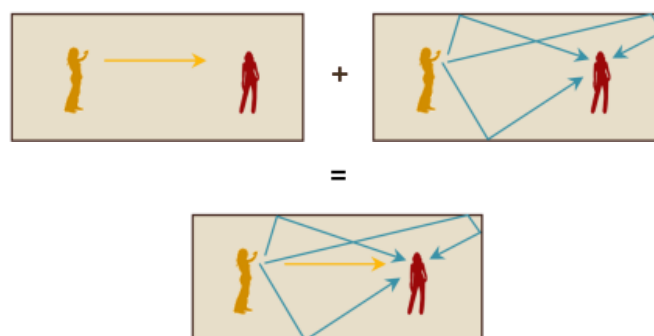


**Figure 16.** La propagation d'une onde sonore (Molinaro, 2017)



## Introduction

Le confort olfactif constitue l'un des éléments essentiels du confort global dans les bâtiments, au même titre que le confort thermique, acoustique ou visuel. Il correspond à la qualité des ambiances olfactives perçues par les occupants à l'intérieur des espaces bâtis et dépend principalement de la qualité de l'air intérieur, de la ventilation ainsi que de l'absence de mauvaises odeurs ou de substances polluantes. Un environnement olfactif agréable contribue directement au bien-être, à la santé et à la satisfaction des usagers, tandis qu'une mauvaise qualité olfactive peut provoquer une sensation d'inconfort, de fatigue, d'irritation ou de stress. Dans les bâtiments modernes, les sources d'odeurs et de pollution intérieure sont nombreuses. Elles peuvent provenir des matériaux de construction, des produits d'entretien, des équipements techniques, des activités humaines, des systèmes d'assainissement ou encore d'une ventilation insuffisante. L'accumulation de ces polluants et odeurs dans les espaces clos peut dégrader considérablement les conditions de vie et affecter la performance des occupants dans les logements, les établissements scolaires, les bureaux ou les espaces publics. Le confort olfactif repose donc sur une bonne maîtrise de la qualité de l'air intérieur à travers des stratégies adaptées de conception et de gestion des bâtiments. Cela inclut notamment le choix de matériaux peu émissifs, l'installation de systèmes de ventilation performants, le renouvellement efficace de l'air, ainsi que le contrôle de l'humidité et des sources potentielles de pollution. Une conception architecturale intégrant ces paramètres permet d'assurer des espaces sains, confortables et favorables au bien-être des utilisateurs. Ainsi, le confort olfactif représente aujourd'hui un enjeu majeur dans le domaine du bâtiment durable et de la qualité environnementale des constructions, en raison de son impact direct sur la santé humaine, le confort sensoriel et la qualité de vie des occupants.

#### **1.4.1. La gêne olfactive**

Les nuisances et gênes olfactives potentielles peuvent provenir aussi bien de l'environnement extérieur que de l'intérieur des bâtiments. Malgré leur impact important sur le bien-être, la santé et la qualité de vie des occupants, ces problématiques demeurent encore insuffisamment prises en compte dans de nombreux programmes architecturaux et projets de construction. Pourtant, les nuisances olfactives jouent un rôle comparable à celui du bruit dans le domaine acoustique, car elles influencent directement la perception du confort et la qualité des ambiances intérieures. À l'intérieur des bâtiments, les sources d'odeurs désagréables sont multiples. Elles peuvent être liées à des pathologies du bâti, telles que l'humidité excessive, les infiltrations d'eau ou le développement de moisissures, qui génèrent des odeurs persistantes et parfois nocives pour la santé. D'autres nuisances olfactives peuvent également provenir des produits stockés ou utilisés dans les locaux, comme les papiers, les produits alimentaires, les déchets ménagers, les produits chimiques ou encore la fumée de cigarette. Les matériaux de construction, les revêtements, les produits d'entretien et certains équipements techniques peuvent aussi émettre des composés organiques volatils susceptibles de dégrader la qualité de l'air intérieur. À l'extérieur, les sources de pollution olfactive sont également nombreuses et dépendent principalement du contexte environnemental et urbain du bâtiment. La présence d'établissements industriels polluants, la proximité d'usines, de décharges ou d'exploitations agricoles, ainsi que les émissions liées au trafic automobile et aux activités urbaines, peuvent fortement altérer la qualité olfactive de l'environnement immédiat. Ces nuisances extérieures peuvent pénétrer à l'intérieur des bâtiments à travers les ouvertures, les systèmes de ventilation ou les défauts d'étanchéité. Le confort olfactif se traduit donc soit par l'absence d'odeurs gênantes, soit par la présence d'odeurs perçues comme agréables et compatibles avec le bien-être des occupants. Il repose essentiellement sur la recherche d'une bonne qualité de l'air ambiant grâce à plusieurs mesures préventives et techniques. Parmi les solutions les plus importantes figurent la limitation des sources de pollution et des émissions odorantes à leur origine, le choix de matériaux et de produits peu polluants, ainsi qu'une ventilation adaptée et efficace des locaux permettant un renouvellement continu de l'air intérieur.

##### **1.4.1.1. Réduire les sources d'odeurs désagréables**

Les sources d'odeurs considérées comme désagréables peuvent provenir de nombreux éléments présents à l'intérieur des bâtiments, soit en raison de la nature même des substances émises, soit à cause de leur concentration excessive dans l'air ambiant. Ces nuisances olfactives peuvent

altérer le confort des occupants, dégrader la qualité de l'air intérieur et, dans certains cas, avoir des effets négatifs sur la santé et le bien-être. Parmi les principales sources d'odeurs indésirables figurent certains produits d'entretien, de maintenance et de nettoyage utilisés quotidiennement dans les bâtiments. Ces produits peuvent contenir des substances chimiques volatiles responsables d'émanations persistantes et parfois irritantes. Les déchets ménagers, organiques ou industriels constituent également une source importante de pollution olfactive, particulièrement lorsqu'ils sont stockés dans des conditions inadaptées ou lorsque leur évacuation n'est pas assurée régulièrement. Les matériaux de construction, les revêtements ainsi que les équipements techniques installés dans les bâtiments ne doivent pas constituer des sources permanentes ou durables d'odeurs désagréables. Il est donc essentiel de privilégier des matériaux à faibles émissions de composés organiques volatils et des équipements conformes aux exigences de qualité sanitaire et environnementale. Une attention particulière doit également être accordée à la phase de conception afin de limiter les risques liés à l'accumulation des polluants et des odeurs dans les espaces intérieurs. Par ailleurs, l'air insufflé dans chaque local doit présenter une qualité satisfaisante et ne pas contenir d'odeurs perçues comme gênantes ou excessives par les occupants. Pour atteindre cet objectif, les systèmes de ventilation doivent assurer un renouvellement efficace de l'air et permettre l'évacuation rapide des polluants et des émanations odorantes. Enfin, l'emplacement des prises d'air neuf et des bouches d'extraction d'air doit faire l'objet d'une étude attentive lors de la conception du bâtiment. Les prises d'air doivent être éloignées des sources potentielles de pollution extérieure, telles que les zones de circulation automobile, les locaux à déchets, les rejets industriels ou les sorties d'air vicié. De même, les dispositifs d'extraction doivent être positionnés de manière à éviter toute recirculation de l'air pollué vers les espaces occupés. Une conception adaptée des systèmes de ventilation contribue ainsi à améliorer durablement le confort olfactif et la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments.

### **1.4.1.2. Ventilation permanente**

Dans un espace confiné ou insuffisamment ventilé, la composition de l'air intérieur se dégrade progressivement sous l'effet de la présence humaine et des différentes activités exercées dans le local. La respiration des occupants, les émissions de dioxyde de carbone, la vapeur d'eau, les odeurs ainsi que les différents polluants générés à l'intérieur modifient progressivement la qualité de l'air ambiant. Lorsque le renouvellement d'air est insuffisant, l'air peut devenir inconfortable, voire impropre à une respiration saine, ce qui peut entraîner une sensation de fatigue, des maux de tête, une baisse de concentration ou des problèmes de santé à long terme.

Dans ce contexte, il est essentiel de choisir un système de ventilation performant, capable d'assurer un renouvellement efficace et continu de l'air intérieur. Le dimensionnement de ce système doit être réalisé avec soin en tenant compte des caractéristiques du bâtiment ainsi que des différents comportements des usagers. En effet, les modes d'occupation des locaux, le nombre d'occupants, les habitudes d'ouverture des fenêtres, les horaires d'utilisation des espaces et la manière dont les utilisateurs commandent ou règlent le système de ventilation influencent directement les besoins réels en renouvellement d'air. Il est également indispensable de vérifier que les débits d'extraction de l'air vicié ainsi que les débits d'air neuf fournis par les équipements techniques ne soient ni sous-évalués ni insuffisants par rapport aux exigences de confort et de qualité sanitaire. Les installations de ventilation doivent garantir une évacuation efficace des polluants, de l'humidité excessive, des odeurs et des contaminants intérieurs, tout en assurant un apport adéquat d'air frais dans chaque local. Une mauvaise évaluation des débits peut compromettre la qualité de l'air intérieur et réduire considérablement le niveau de confort des occupants. Cependant, la nécessité d'assurer une ventilation efficace peut parfois entrer en contradiction avec les objectifs de maîtrise et d'économie d'énergie. En effet, les systèmes de ventilation, notamment lorsqu'ils fonctionnent en continu ou dans de grands bâtiments, peuvent représenter une part importante de la consommation énergétique globale. Il devient alors nécessaire de trouver un équilibre entre les exigences de qualité de l'air intérieur et les objectifs de performance énergétique. Pour répondre à cette problématique, les bâtiments modernes privilégient de plus en plus des solutions techniques innovantes, telles que les systèmes de ventilation à double flux, la récupération de chaleur, la ventilation naturelle contrôlée ou encore les dispositifs de régulation intelligente adaptés à l'occupation réelle des locaux. Ces solutions permettent d'améliorer simultanément le confort des occupants, la qualité de l'air intérieur et l'efficacité énergétique des bâtiments.

# **CHAPITRE II**

## **II MÉTHODES D'ÉVALUATION ET DE DIAGNOSTIC**

*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 toutes 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*



## **II.1 LE DÉVELOPPEMENT DURABLE ET LA QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE**

### **introduction**

La demande d'un environnement durable, et plus particulièrement d'une architecture durable, est aujourd'hui omniprésente dans les politiques de développement, les projets urbains et les pratiques de construction. La consommation excessive des énergies fossiles entraîne une augmentation importante des émissions de gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et d'autres polluants atmosphériques, contribuant ainsi au réchauffement climatique et aux déséquilibres environnementaux à l'échelle mondiale. Ces phénomènes ont des conséquences directes sur les écosystèmes, les ressources naturelles, la biodiversité ainsi que sur les conditions de vie des populations. Les dangers qui menacent aujourd'hui notre planète et ses habitants rendent indispensable une remise en question profonde de nos modes de production, de consommation et d'aménagement du territoire. Cette prise de conscience mondiale encourage le développement de solutions plus responsables fondées sur les principes du développement durable, visant à concilier progrès économique, protection de l'environnement et bien-être social. Dans ce contexte, l'architecture écologique ou éco-responsable apparaît comme une nécessité incontournable. Elle vise à concevoir des bâtiments capables de répondre aux besoins des occupants tout en limitant leur impact environnemental durant l'ensemble de leur cycle de vie. Une architecture durable doit être à la fois confortable, fonctionnelle, économe en énergie et en matières premières, mais également respectueuse des ressources naturelles et des équilibres écologiques.

### 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.

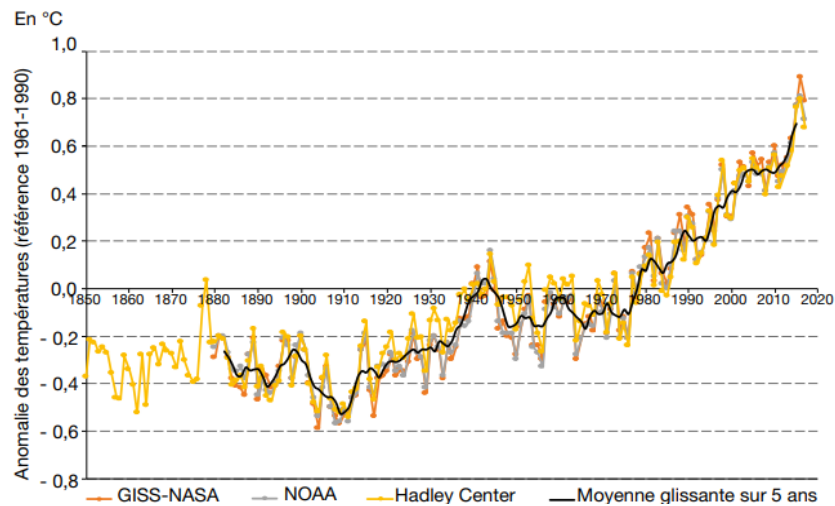


**Figure 17.** Evolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2017  
(NASA, NOAA, Hadley Center)

### 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).

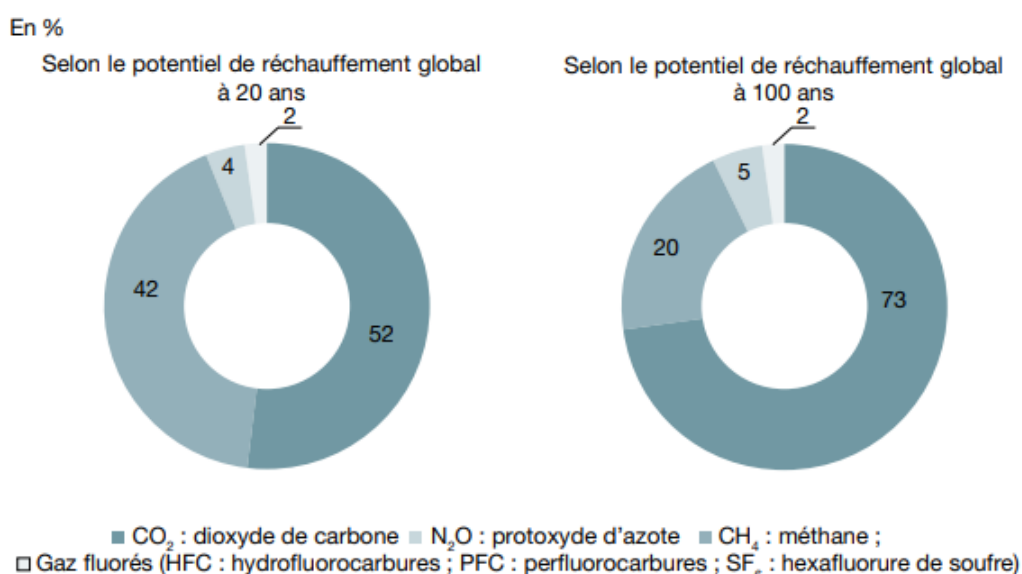


**Figure 18.** Répartition des émissions mondiales de GES (y compris UTCATF) par gaz en 2010  
 (D'après Giec, 3<sup>e</sup> groupe de travail, 2014)

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 maîtres 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 qualifiée et indépendante, 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].

A stylized illustration featuring a yellow sun with rays on the left and a grey house roof with a yellow chimney on the right. The background is a light yellow gradient.

## **II.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. Ces méthodes traduisent les différents facteurs physiques et environnementaux en indices de sensation et de confort permettant de mesurer objectivement les performances des ambiances intérieures. L'évaluation peut être réalisée à travers plusieurs approches complémentaires, telles que les méthodes de calcul empirique, l'utilisation d'indices et de diagrammes de confort, les enquêtes et observations réalisées sur le terrain auprès des usagers, ainsi que les expérimentations effectuées à l'aide de modèles physiques ou numériques. Grâce à ces outils d'analyse et de simulation, il devient possible de concevoir des bâtiments plus performants, plus confortables et mieux adaptés aux exigences du développement durable et du bien-être des occupants.

### 2.2.1. Les mesures *n situ*

Ces méthodes permettent de caractériser avec précision les ambiances intérieures des bâtiments et d'obtenir des valeurs réelles et mesurables relatives aux différents paramètres environnementaux, tels que la température, le niveau sonore, l'éclairage, la luminance ou encore la qualité de l'air intérieur. L'objectif principal de ces mesures est d'évaluer les performances du bâtiment ainsi que le niveau de confort et de bien-être ressenti par les occupants. Elles constituent également un outil essentiel d'aide à la conception, au diagnostic et à l'amélioration des conditions environnementales intérieures. Les types de mesures pouvant être réalisés sont nombreux et couvrent plusieurs domaines liés au confort et à la performance du bâtiment. Parmi les principales mesures, on peut citer :

- **Les mesures relatives au bien-être des occupants** : elles concernent notamment l'évaluation du confort thermique, le traitement et l'analyse des plaintes des usagers, les enquêtes de satisfaction, les questionnaires de perception ainsi que les observations comportementales des occupants.
- **Les mesures relatives à l'aération et à la qualité de l'air intérieur** : elles incluent l'évaluation de la perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment, les débits de renouvellement d'air, le contrôle des systèmes de ventilation, le taux d'humidité ainsi que l'analyse des polluants et de la qualité sanitaire de l'air intérieur.
- **Les mesures acoustiques** : elles permettent d'évaluer le niveau sonore dans les espaces intérieurs, le temps de réverbération, les performances d'isolation aux bruits aériens et aux bruits d'impact, ainsi que la propagation des vibrations et des nuisances sonores dans le bâtiment.
- **Les mesures liées à l'éclairage et au confort visuel** : elles concernent l'éclairage naturel et artificiel, la luminance, le niveau d'éblouissement, l'uniformité lumineuse et la qualité globale de l'ambiance visuelle.
- **Les mesures de performance thermique** : elles portent sur l'isolation thermique des composants du bâtiment, les déperditions énergétiques, les ponts thermiques, les températures de surface ainsi que le comportement thermique des matériaux et des enveloppes.
- **Les mesures de consommation énergétique** : elles permettent d'évaluer les consommations réelles d'énergie, les indices de dépense énergétique, les signatures énergétiques des bâtiments ainsi que l'efficacité des équipements techniques installés.

Afin que les opérations de diagnostic et de mesure soient réellement efficaces et exploitables, il est indispensable de définir au préalable les objectifs précis de l'étude ainsi que les informations recherchées. Une bonne préparation permet de choisir les méthodes de mesure les plus adaptées et de s'assurer que les données collectées répondront aux besoins de l'analyse. Il est également recommandé de déterminer, avant toute expérimentation, les méthodes d'interprétation et de traitement des résultats afin de garantir la fiabilité des analyses et la pertinence des conclusions obtenues. Cette démarche méthodologique contribue à améliorer la qualité des études et à optimiser les performances environnementales et le confort des bâtiments.

Il est également important pour effectuer des mesures sur site, qu'on soit équipé 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)

### 2.2.2. 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'éclairement 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'éclairement du point considéré. Il existe plusieurs diagrammes pour divers types de ciels, permettant des calculs pour différentes conditions extérieures.

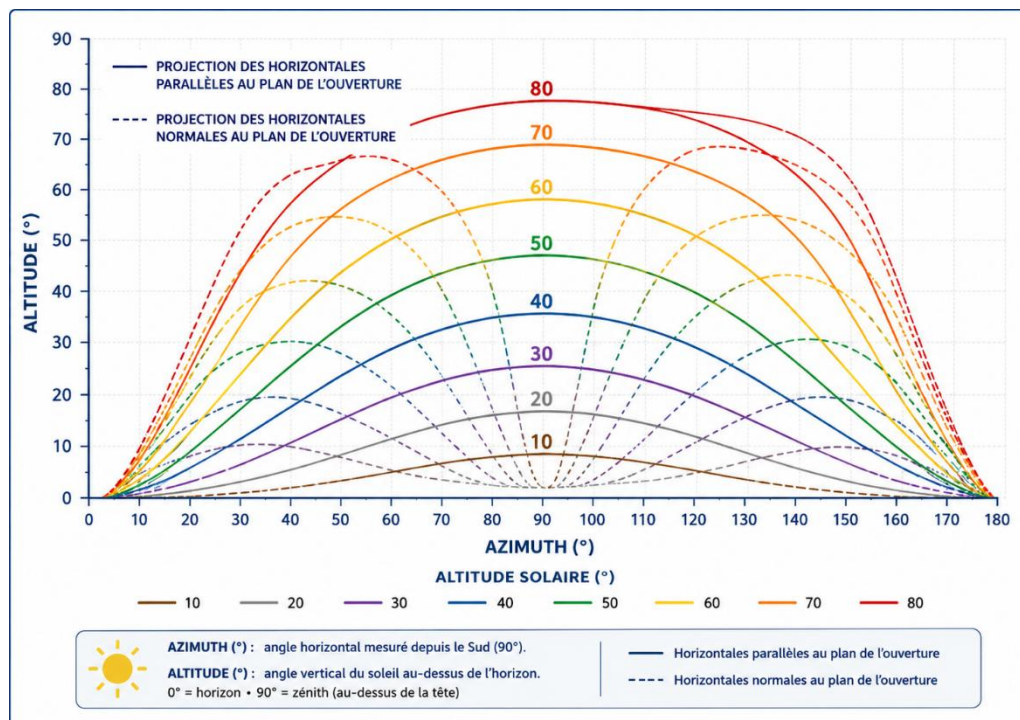


Figure 20. Diagramme de Waldram (Source : Francis Miguet, 2000)

-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 éclairements 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 14-002/41 pour les calculs sous éclairage artificiel. Elle permet, quant à elle, le calcul point par point des éclairements sous éclairage artificiel.

#### **2.2.2.1. 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 prise en compte lors de calcul comme la nature, l'exposition, la surface des murs, des parois vitrées, des plafonds, des sols. Ces dernières sont étant multiplier par des coefficients variables selon l'altitude, le rayonnement solaire, la localisation géographique...etc. d'autres éléments doivent aussi prise 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)

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

**UBAT** : représente la déperdition thermique totale moyenne d'un bâtiment (toutes parois) (W/m<sup>2</sup>.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 thermiques
- 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.

**S<sub>dep</sub>** : somme de surfaces des parois (m<sup>2</sup>)

**V<sub>h</sub>** : volume habitable de la zone traitée (m<sup>3</sup>)

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

**19** : température de confort

**T ext base** : température extérieure de base du lieu d'habitation.

### 2.2.3. 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.

#### 2.2.3.1. 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)

**Température opérative = Température de l'air + Température des parois**

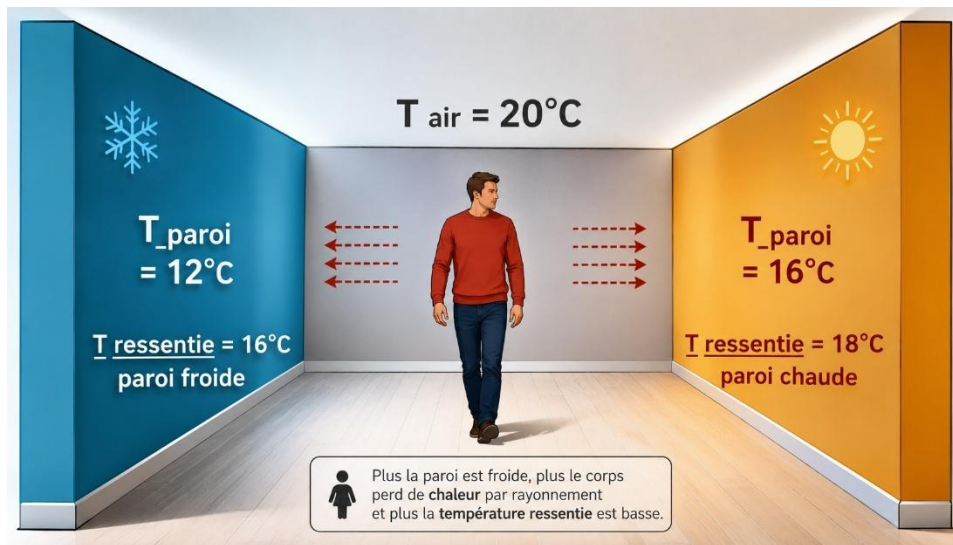


**Figure 21. La Température opérative**  
(Confort hygrothermique et réduction des consommations d'énergie, 2014)

### 2.2.3.2. 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  $m^2^{\circ}C/W$ .

### 2.2.3.3. 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.

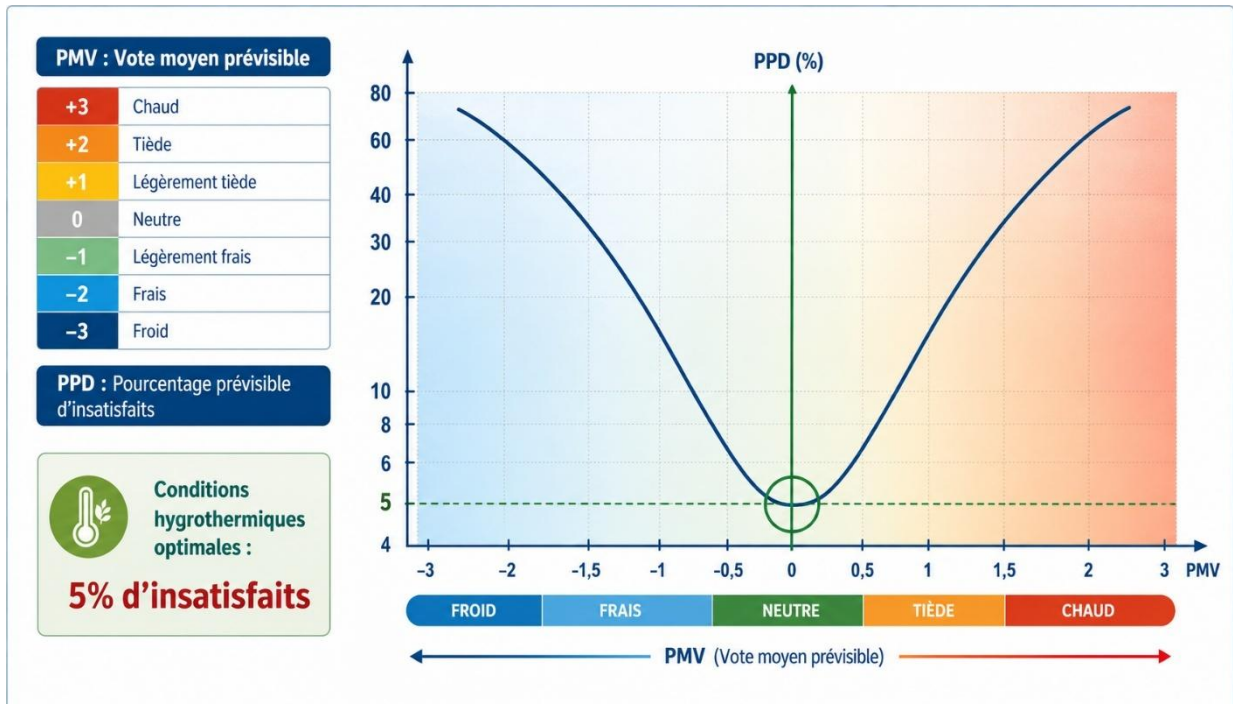


*Figure 22. Analyse PMV/PPD de la sensation de confort hygrothermique (Confort hygrothermique et réduction des consommations d'énergie, 2014)*

### 2.2.4.1. 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).

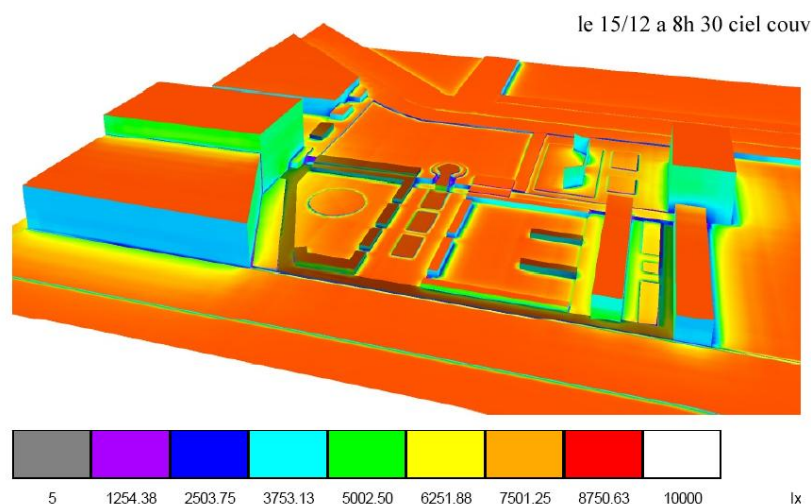


Figure 23. Simulation thermique à l'échelle urbaine (source : Auteur)

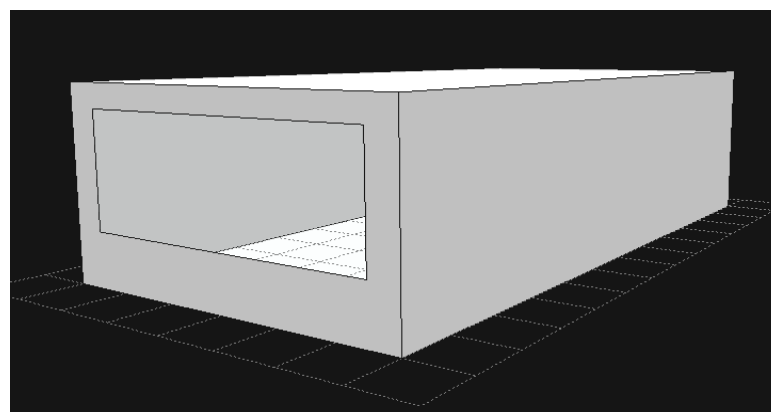


Figure 24. Model numérique pour la simulation (source : Daich, 2011)

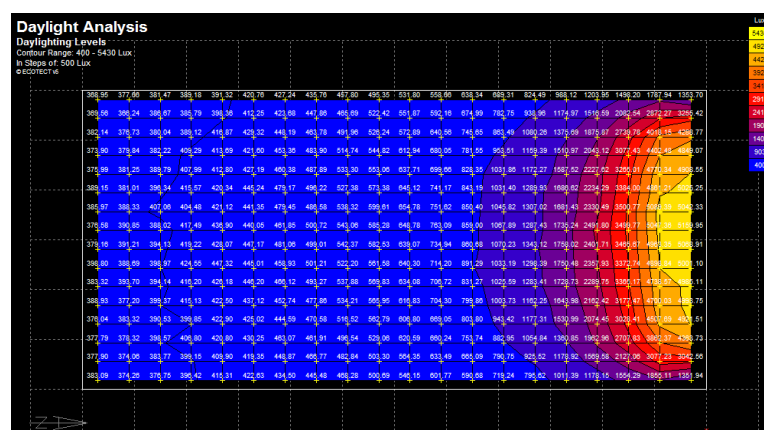


Figure 25. Simulation de l'éclairage à l'échelle architecturale (source : Daich, 2011)

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.

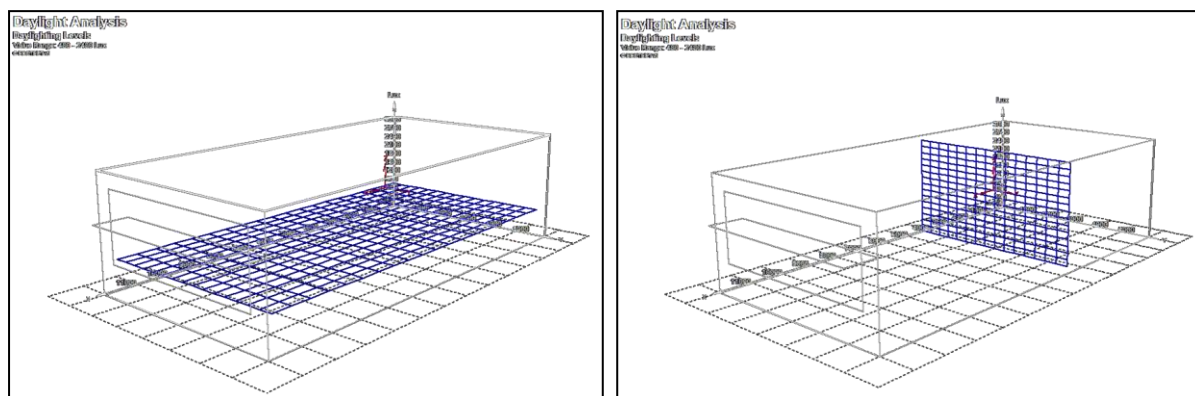


**Figure 26.** La grille structurelle : à gauche, grille structurelle horizontale ; à droite, grille structurelle verticale (source : Daich, 2011)

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.

#### **2.2.5.1. 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.

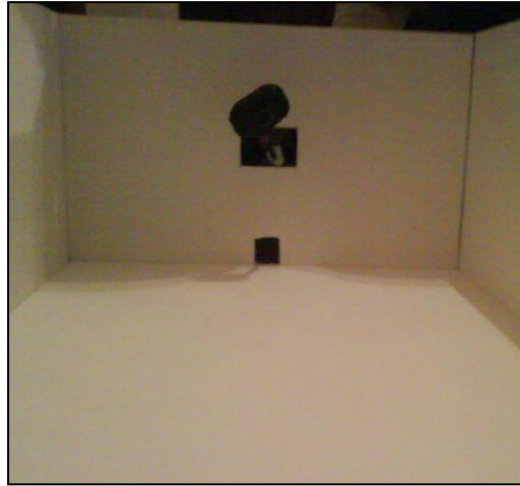


**Figure 28.** Modèle physique échelle  $\frac{1}{4}$  (source : Daich et al, 2011)

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.

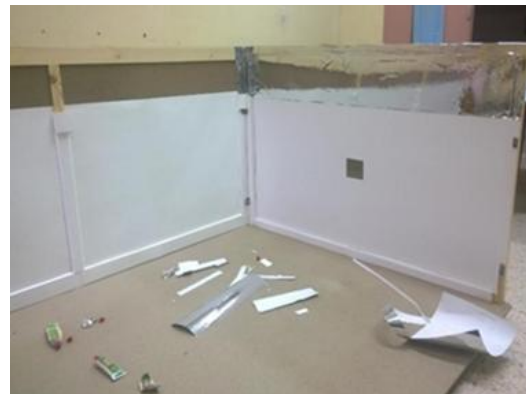


**Figure 29.** Modélisation des parois échelle  $\frac{1}{4}$  (source : Daich, 2019)

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 toutes 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 précis.



**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 carton |
|---------------------------|-----------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------|
|                           |                 | Coeff réflexion (%) | Marque Canson        | Coeff réflexion (%) |                |
| 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

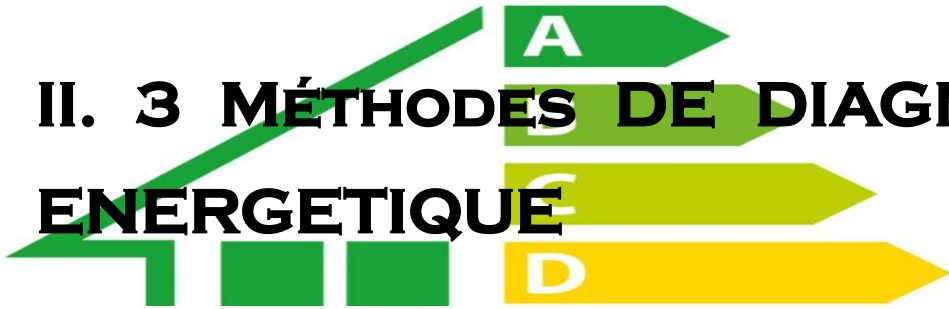
verticalement (sur les murs). Donc, on doit pouvoir accéder à l'intérieur du modèle pour placer ses instruments à proximité des points de mesure. Nous avons trois possibilités, soit on les fait passées par les ouvertures tels que les fenêtres tout en faisant attention que les fils des luxmètres ne passent 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'éclairement 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))]



## II. 3 MÉTHODES DE DIAGNOSTIC ÉNERGETIQUE

### Introduction

Les calculs préliminaires réalisés avant la construction permettent d'estimer la consommation énergétique future du bâtiment. Toutefois, cette estimation reste théorique, car la consommation réelle dépend largement du comportement des occupants, pouvant varier de plus ou moins 50 % par rapport à une utilisation moyenne. En effet, les habitudes quotidiennes des habitants, telles que le chauffage, la climatisation, l'éclairage, l'utilisation des équipements électroménagers ou encore l'aération des espaces, influencent directement les performances énergétiques du bâtiment. Ainsi, le suivi et la mesure de la consommation énergétique réelle constituent une étape essentielle après la mise en service du bâtiment. Ces mesures permettent non seulement de vérifier la conformité entre les performances prévues et les performances obtenues, mais aussi de détecter d'éventuels dysfonctionnements techniques ou des pertes énergétiques anormales. Une analyse approfondie des données recueillies peut révéler plusieurs types de défauts, comme une mauvaise isolation thermique, des équipements peu performants, des infiltrations d'air, un réglage inadéquat des systèmes de chauffage ou de ventilation, ou encore une utilisation inadaptée des installations par les occupants. Par conséquent, l'interprétation détaillée des consommations énergétiques joue un rôle déterminant dans l'établissement d'un diagnostic précis. Elle permet d'identifier les causes réelles des écarts observés et d'envisager des solutions correctives afin d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment, de réduire les coûts de consommation et de garantir un meilleur confort aux usagers tout en limitant l'impact environnemental.

### 2.3.1. Les méthodes de diagnostic

Une fois le bâtiment réalisé, ou dans le cas d'un bâtiment existant destiné à une réhabilitation énergétique, la mise en place de campagnes de mesures in situ devient une étape essentielle du processus de suivi et d'évaluation des performances (ASHRAE, 2017 ; ISO 50015:2014). Ces mesures permettent d'une part de vérifier si le bâtiment fonctionne conformément aux hypothèses retenues lors de la phase de conception et de simulation, et d'autre part d'assurer un contrôle continu de son comportement énergétique au cours du temps. Elles constituent ainsi un outil indispensable pour l'évaluation de la performance réelle et l'identification des écarts éventuels entre les performances théoriques et les performances observées (Fumo, 2014). Ces campagnes de mesures peuvent poursuivre plusieurs objectifs complémentaires. Elles permettent notamment de vérifier la conformité des consommations énergétiques réelles par rapport aux estimations initiales, d'évaluer le confort thermique, hygrothermique, visuel et parfois acoustique des occupants, ainsi que de diagnostiquer les dysfonctionnements éventuels des systèmes techniques du bâtiment (chauffage, ventilation, climatisation, éclairage et régulation) (Li & Yang, 2015). Elles peuvent également être utilisées dans une logique d'optimisation énergétique, afin d'améliorer l'efficacité des installations et de réduire les consommations en phase d'exploitation, dans une perspective de performance durable (Mastrucci & Marique, 2015). De manière générale, les méthodes de mesure peuvent être classées selon différents critères. Elles peuvent être organisées en fonction de l'objectif de la mesure (diagnostic, suivi de performance, validation de modèle, optimisation énergétique, maintenance prédictive), ou encore selon l'objet mesuré (paramètres climatiques, variables thermiques, consommations énergétiques, qualité de l'air intérieur, débits d'air, niveaux d'éclairement, humidité relative, etc.) (Granderson & Price, 2014). Chaque catégorie de mesure requiert des instruments spécifiques ainsi qu'une méthodologie rigoureuse de collecte, d'enregistrement et d'analyse des données afin de garantir la fiabilité et la représentativité des résultats. Dans ce contexte, les outils de monitoring énergétique des bâtiments jouent un rôle de plus en plus important dans la gestion intelligente des bâtiments modernes. L'intégration de capteurs connectés, de systèmes d'acquisition de données en temps réel et de plateformes d'analyse permet aujourd'hui d'assurer un suivi continu des performances et d'optimiser le fonctionnement des équipements (U.S. DOE, 2016). Dans cette section, nous allons présenter quelques méthodes de mesure particulièrement pertinentes pour le contrôle du fonctionnement énergétique d'une habitation, en mettant l'accent sur les principaux paramètres physiques influençant le confort des occupants et la performance globale du bâtiment.

#### **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)**

L'intérêt principal de l'IDE réside dans sa simplicité de calcul et d'interprétation. En effet, la comparaison de cet indicateur avec des valeurs de référence issues de bases statistiques ou de bâtiments similaires permet de situer rapidement un bâtiment par rapport à la moyenne du parc immobilier. Il devient ainsi possible d'identifier si un bâtiment est un faible consommateur énergétique ou, au contraire, un bâtiment énergivore nécessitant des actions d'amélioration (ASHRAE, 2017 ; ISO 52000-1:2017). Cependant, malgré son utilité en phase d'analyse préliminaire, l'IDE reste un indicateur global qui ne permet pas de distinguer les différents usages énergétiques (chauffage, refroidissement, éclairage, équipements, etc.). Il ne prend pas non plus en compte les variations climatiques, les comportements des occupants ou les spécificités techniques du bâtiment. Pour cette raison, il est généralement complété par d'autres indicateurs plus détaillés dans les études de performance énergétique avancées (CEN/ISO 52016-1, 2017). Ainsi, l'indice de dépense d'énergie constitue un outil de diagnostic rapide et synthétique, particulièrement utile dans les phases initiales d'évaluation énergétique et dans les comparaisons à l'échelle du parc bâti.

#### **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).

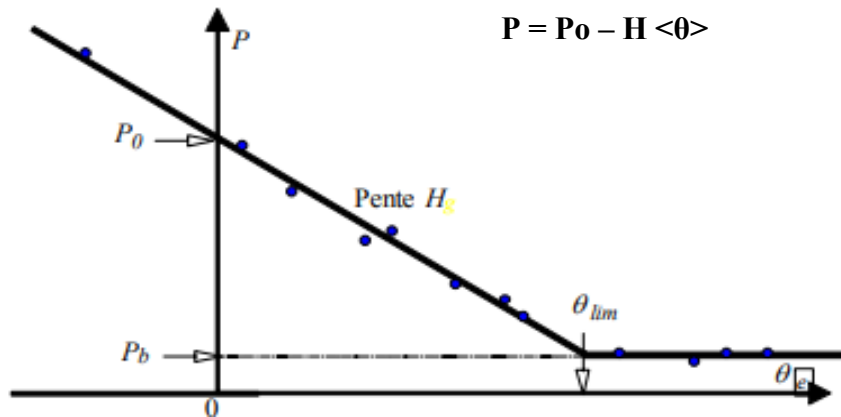


Figure 33. Principe de la signature énergétique (source : Roulet, 2000)

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 :

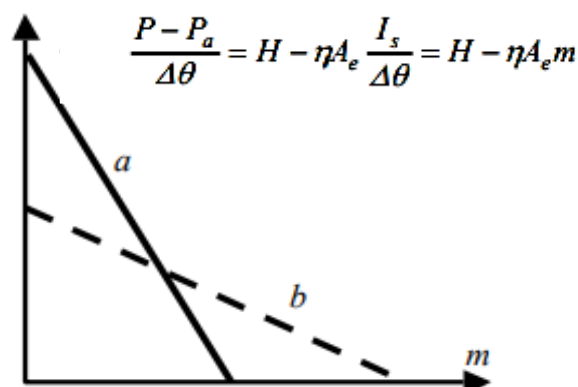


Figure 34. Principe de méthode H-m (source : Roulet, 2000)

La droite a représenté 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.

## **CHAPITRE III**

### **III. LES LOGICIELS DE SIMULATION ET DE MODELISATION**

*Les outils de modélisation et de simulation des performances des bâtiments sont de plus en plus utilisés pour prédire les performances d'un bâtiment, non seulement en termes de réduction de la consommation d'énergie mais également de son impact sur l'amélioration du bien-être des occupants. Les outils de simulation de la performance du bâtiment « Building Performance Simulation Tools » ont trouvé un rôle croissant dans la phase de conception des bâtiments pour démontrer la conformité réglementaire sur la performance des bâtiments. Cela a conduit à une collaboration tangible entre les architectes et leurs consultants aux tout premiers stades de la création d'un projet.*



## Introduction

Le domaine de l'éclairage architectural a ainsi connu le développement de nombreux logiciels performants, parmi lesquels on peut citer « DIALux », « VELUX Daylight Visualizer », « ECOTECT », « Énergie+ », « Radiance », ainsi que d'autres outils de simulation numérique. Ces logiciels offrent la possibilité d'étudier avec précision le comportement de la lumière à l'intérieur des espaces architecturaux, qu'il s'agisse de lumière naturelle ou artificielle. Ils permettent de réaliser des analyses quantitatives afin de déterminer les niveaux d'éclairement, de luminance et de répartition lumineuse dans chaque point d'un local. Grâce à ces simulations, il devient possible d'évaluer le confort visuel des occupants et d'optimiser la qualité de l'éclairage en fonction des usages des espaces. L'un des principaux avantages de ces logiciels réside dans leur facilité de manipulation et dans la précision des résultats obtenus, souvent très proches des conditions réelles. Grâce aux progrès des techniques de simulation numérique, les concepteurs peuvent tester plusieurs scénarios d'éclairage, comparer différentes solutions architecturales et corriger les défauts avant même la phase de réalisation du projet. Aujourd'hui, de nombreux projets architecturaux à travers le monde sont conçus et optimisés à l'aide de ces outils numériques. Leur utilisation est devenue indispensable dans les démarches contemporaines de conception, notamment pour garantir le confort visuel, améliorer la performance énergétique des bâtiments et assurer une meilleure qualité des espaces intérieurs.

### **3.1.1. Les types de simulateurs**

L'étude de l'éclairage naturel dans un local par l'utilisant des maquettes à échelle réduite ou réel peut se faire sous un ciel réel ou un ciel artificiel. Le ciel réel est caractérisé par l'instabilité de la luminance, il est très variable dans le temps, il dispose d'instrumentation très complexe et ne permet pas de mesures comparables. Alors que le ciel artificiel est un outil validé scientifiquement et utilisé dans plusieurs laboratoires d'études d'éclairage reconnus mondialement, dont le GRAP (Groupe De Recherche En Ambiances Physiques). Il est caractérisé par un environnement lumineux stable dans le temps et qu'il permet de réaliser des mesures sous des conditions lumineuses précises, ce qui permet de comparer entre les projets. Ce type de ciel est particulièrement adapté aux besoins des architectes dans l'intégration de stratégies d'éclairage naturel, assurant un lien étroit entre les différentes étapes de conception du projet architectural ainsi que les besoins particuliers en éclairage.

Il existe différentes instrumentations nécessaires dans la simulation dont :

#### **3.1.1.1. Mirror box**

Le Mirror box est appelé aussi ciel à miroir, c'est une boîte de forme cubique de plus de 3 mètres de côté. Il est composé des murs intérieurs revêtus de miroirs très réfléchissants et d'un plafond lumineux constitué de 101 tubes fluorescents masqués par un matériau diffusant. Ce type de ciel offre plusieurs avantages, c'est un outil simple et maniable pour simuler un ciel couvert, comme le définit la Commission internationale de l'éclairage CIE. L'éclairement résultant sur le plan horizontal situé à la base du cube est de 10.000 lux et présente une très bonne uniformité. Les mesures s'effectuent à l'aide de luxmètres placés à l'intérieur et à l'extérieur du modèle réduit. Une caméra équipée d'un objectif à grand angle est utilisée pour visualiser les ambiances intérieures, et fournit à l'utilisateur la représentation de la distribution lumineuse, comme s'il était à l'intérieur même du bâtiment.

Le Mirror box permet aussi de tester différentes configurations de façades et donne des résultats très précis. Il est très didactique et permet d'étudier des modèles relativement grands dans une courte durée et avec moindre coût. Le seul inconvénient d'un Mirror box, qu'il ne permet pas de simuler différents types de ciel et ne tient pas compte de la composante directe du soleil.

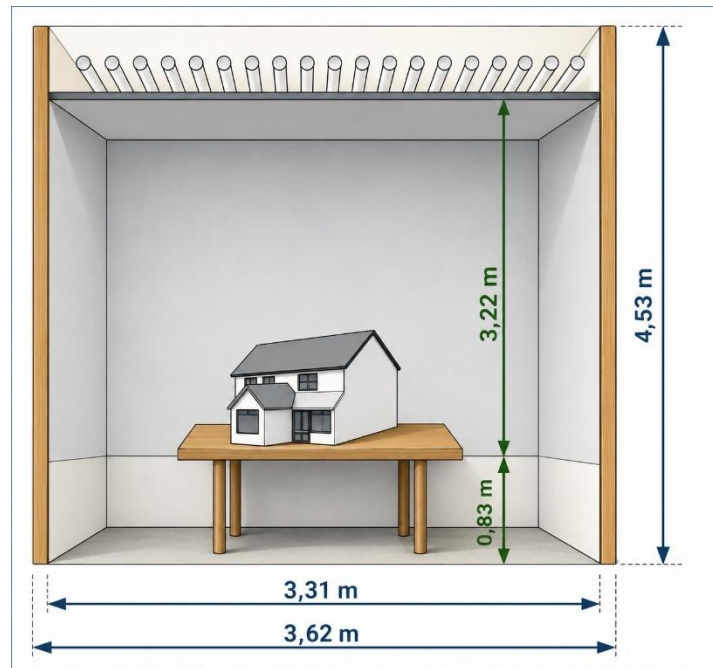


*Figure 35. Schéma de principe de la Mirror box  
(Source : Deneyer, 2003)*

### 3.1.1.2. Ciel artificiel à une lampe

Le ciel artificiel à une lampe un outil plus complexe et plus puissant, destiné à simuler tout type de ciel, y compris celui qui fait intervenir la composante directe du soleil. Il repose sur un principe de subdivision du ciel en 145 disques lumineux (distribution théorique modifiée de Tregenza). Ces disques lumineux sont juxtaposés les uns aux autres, de manière à assurer une couverture complète du dôme (voir figure 149). L'intensité de leur flux lumineux est adaptée pour simuler les différents types de ciels : ciel couvert, clair, partiellement nuageux, etc ... Le ciel artificiel à une lampe permet des mesures précises d'éclairage naturel dans n'importe quelle heure et n'importe quel type de ciel choisis dans une courte durée d'environ 70 minutes. Ce type de ciel, et à l'opposé de la Mirror box ne permet pas de vue directe des ambiances lumineuses atteintes à l'intérieure du modèle, mais nous pouvons recomposer une vue de l'ambiance par la recomposition informatique des images prises lors du positionnement aux 145 positions.

Le modèle doit être fixé sur un socle dur qui dépasse de 3 cm au moins des parois du modèle et qu'il ait une hauteur maximale de 3 cm avant d'être fixé sur le plateau tournant. Le mobilier aussi doit être fixé au modèle, car la maquette va obéir différente rotation selon différents angles. Le poids total de la maquette sera limité à 15 kg pour, d'une part permettre à la table d'effectuer ses mouvements de rotation et, pour d'autre part, ne pas gêner la manutention.

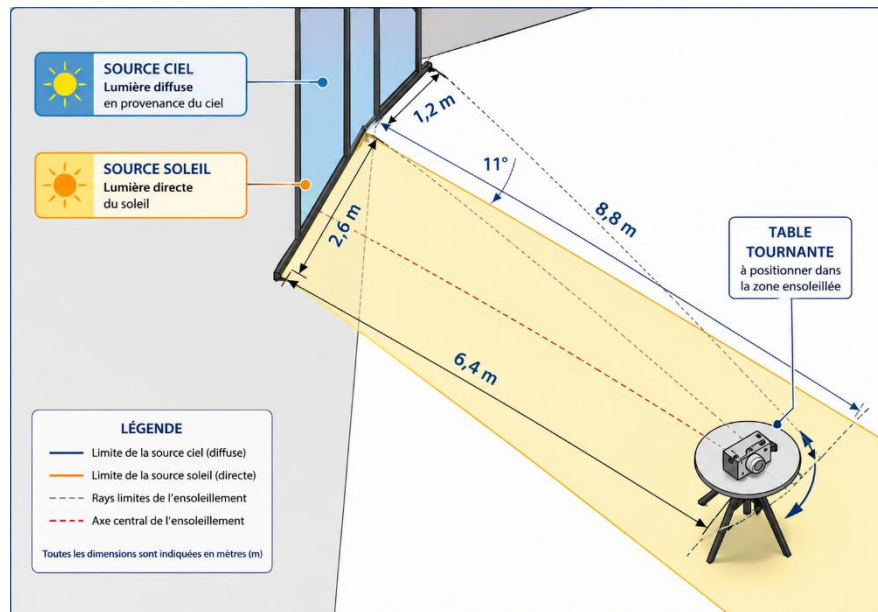


**Figure 36.** Ciel artificiel à une lampe  
(Source : Deneyer, 2003)

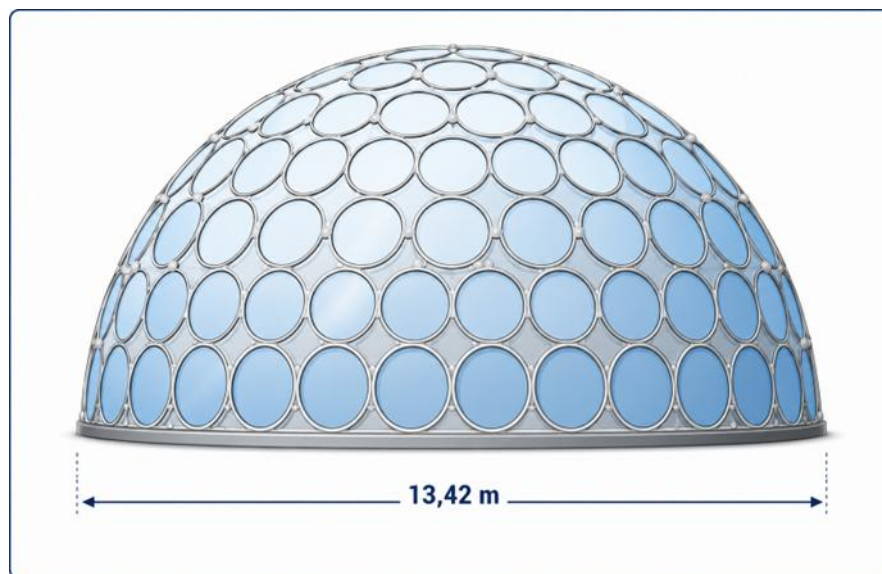


**Figure 37.** Vue en coupe des disques du dôme  
(Source : Deneyer, 2003)

### 3.1.1.3. Soleil mécanique

Le soleil mécanique est un outil didactique qui permet de visualiser notre perception du mouvement du soleil. Il est constitué d'une lampe mobile se déplaçant autour d'un modèle réduit et décrivant le mouvement du soleil pour une latitude donnée. Pour chaque simulation, le soleil décrit un cercle qui correspond à la base d'un cône dont l'axe principal est incliné. L'angle d'inclinaison de cet axe correspondant à la latitude du site considéré. La longueur du côté du cône dépend du jour choisi. Sous ce simulateur, aucune mesure n'est effectuée. Il n'est utilisé que pour

visualiser le déplacement du soleil et les ombres ou taches solaires associées.

#### 3.1.1.4. Soleil artificiel à une lampe

Le soleil artificiel à une lampe est un simulateur qui permet une étude plus détaillée que le soleil mécanique car il combine observations et mesures. Il se compose de 91 petites lampes halogènes fixées au plafond. Son mouvement relatif est réalisé par la rotation de la maquette autour de deux axes indépendants. Il peut être utilisé pour évaluer l'aspect visuel induit par les rayons solaires. Cette observation est directe. Elle doit cependant être superposée aux valeurs obtenues lors des mesures sous ciel diffus, afin de refléter la réalité obtenue par combinaison du ciel clair avec le soleil. Les modèles sont fixés sur le plateau tournant via un système d'attaches réglables en fonction de la taille du modèle.

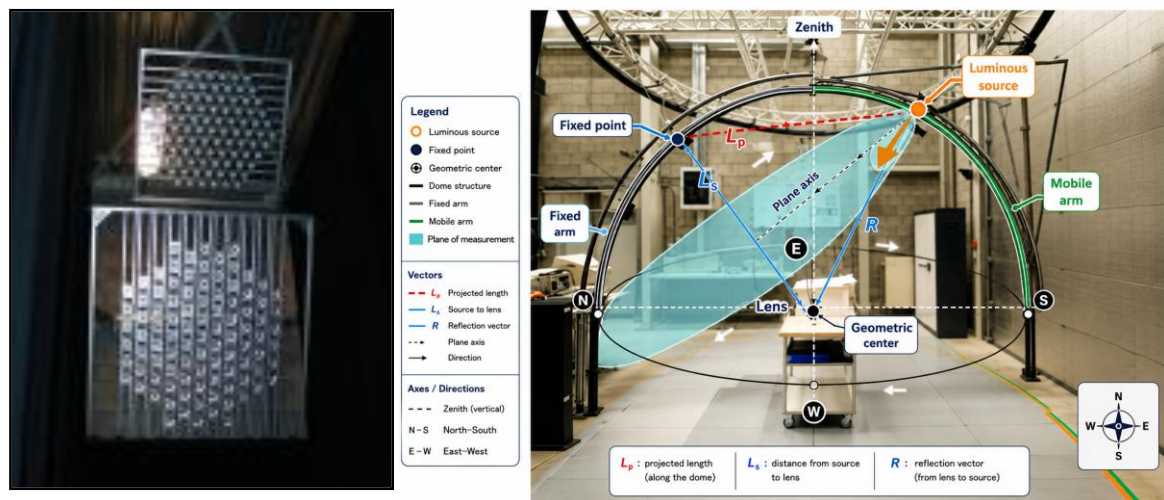


**Figure 38.** *Soleil artificiel à une lampe : à gauche, Dispositif de ciel au-dessus et de soleil en dessous. (Source : Deneyer, 2003) ; à droite, Soleil mécanique (Source : Les Dossiers du CSTC 2011/3.18)*

#### 3.1.2. Les logiciels de simulation de l'éclairage dans le bâtiment

Pendant ces dix dernières années, le domaine informatique a connu un progrès important, ce qui a donné naissance à des nouveaux programmes de simulation qui ont touché le domaine du bâtiment, ou les architectes ont commencé à utiliser ces multiples logiciels pour la prédétermination de la lumière naturelle dans leurs projets. Ces outils informatiques sont de deux catégories basés sur deux méthodes de calcul différentes : la technique de la radiosité et la méthode du lancer de rayon inverse. La méthode de la radiosité traite des échanges radiatifs entre surfaces parfaitement diffusantes formant un espace clos. Les logiciels basés sur la méthode de la radiosité traitent des volumes simples, éclairés par des ouvertures rectangulaires ou les calculs

ne tiennent pas compte des surfaces spéculaires ni de l'aspect spectral du phénomène lumineux. Ainsi, ils sont généralement couplés à une base de données climatique. Alors que la méthode du lancer de rayon inverse tient compte de tous les phénomènes optiques qui peuvent être exprimé analytiquement par des équations physiques. Elle peut intégrer des matériaux spéculaires, semi-s spéculaires, diffus, réfractant ou translucides. Cette méthode peut simuler de manière efficace des textures non-homogènes et des surfaces infiniment petites. Le bon exemple de logiciel utilisant cette méthode de calcul de propagation de la lumière est Radiance. Cependant, ces programmes demandent en général un temps d'apprentissage assez long et une certaine expérience. Ils sont donc réservés aux personnes spécialisées dans le domaine de l'éclairage naturel. Ils demandent également un temps de calcul relativement long. Ces logiciels requièrent également une description détaillée de tous les éléments de l'espace à modéliser et ne sont donc pas applicables au stade de l'esquisse ou de l'avant-projet. Le tableau présenté ci-dessous donne un aperçu et une description détaillée de quelques logiciels de simulation de l'éclairage dans le bâtiment existant :

**Tableau 3.** Les différents logiciels de simulation de l'éclairage (source : Deroisy & Deneyer, 2011)

| LOGICIEL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | ÉDITEUR          | MÉTHODE                                                 | MODÉLISATION                                                                                                                                                                               | TYPES DE CIEL                                                                                                                                                                                               | RÉSULTATS                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <b>Ecotect</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Autodesk         | <i>Split flux formula</i>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Géométries simples</li> <li>✓ Surfaces diffuses</li> <li>✓ Maillage paramétrable</li> </ul>                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>☁ Ciel couvert CIE</li> <li>☁ Ciel uniforme CIE</li> <li>☀ Soleil direct</li> </ul>                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>💡 Éclairements [lux]</li> <li>☀ Facteurs de lumière du jour (%)</li> <li>🔦 Visualisation des ombrages</li> </ul>                                                                                  |
|  <b>Dial-Europe</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Estia            | <i>Split flux formula</i>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Géométries simples</li> <li>✓ Surfaces diffuses</li> <li>✓ Maillage fixe</li> </ul>                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>☁ Ciel couvert CIE</li> </ul>                                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>💡 Facteurs de lumière du jour (%)</li> <li>☀ Visualisation des ombrages</li> </ul>                                                                                                                |
|  <b>DIALux</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | DIAL GmbH        | <i>Radiosity (raytracing pour les visualisations)</i>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Géométries complexes</li> <li>✓ Surfaces diffuses</li> <li>✓ Maillage paramétrable</li> </ul>                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>☁ Ciel couvert CIE</li> <li>☁ Ciel intermédiaire</li> <li>☀ Ciel clair CIE (soleil direct)</li> </ul>                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>💡 Éclairements [lux]</li> <li>☀ Facteurs de lumière du jour (%)</li> <li>🔦 Luminances (cd/m<sup>2</sup>)</li> <li>🔦 Visualisation des scènes</li> </ul>                                           |
|  <b>Relux Pro</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Relux Informatik | <i>Radiosity (raytracing pour les visualisations)</i>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Géométries complexes</li> <li>✓ Surfaces diffuses</li> <li>✓ Maillage paramétrable</li> </ul>                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>☁ Ciel couvert CIE</li> <li>☁ Ciel clair CIE (sans soleil direct)</li> </ul>                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>💡 Éclairements [lux]</li> <li>☀ Facteurs de lumière du jour (%)</li> <li>🔦 Luminances (cd/m<sup>2</sup>)</li> <li>🔦 Visualisation des scènes</li> </ul>                                           |
|  <b>3DS max</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Autodesk         | <i>Radiosity + raytracing</i>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Toutes géométries</li> <li>✓ Surfaces diffuses, spéculaires ou mixtes</li> <li>✓ Maillage paramétrable</li> </ul>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>☁ Tout type de ciel</li> </ul>                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>💡 Éclairements [lux]</li> <li>☀ Facteurs de lumière du jour (%)</li> <li>🔦 Luminances (cd/m<sup>2</sup>)</li> <li>🔦 Visualisation des scènes</li> </ul>                                           |
|  <b>Velux Daylight Visualizer</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Velux            | <i>Raytracing + photon mapping</i>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Géométries complexes (via import fichiers 3D)</li> <li>✓ Surfaces diffuses, spéculaires ou mixtes</li> <li>✓ Maillage non paramétrable</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>☁ 15 types de ciels, dont : <ul style="list-style-type: none"> <li>• ciel couvert CIE</li> <li>• ciel intermédiaire</li> <li>• ciel clair CIE</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>💡 Éclairements [lux]</li> <li>☀ Facteurs de lumière du jour (%)</li> <li>🔦 Luminances (cd/m<sup>2</sup>)</li> <li>🔦 Visualisation des scènes</li> </ul>                                           |
|  <b>Radiance</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | LBNL             | <i>Raytracing (extension photon mapping disponible)</i> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Toutes géométries</li> <li>✓ Tout type de surface</li> <li>✓ Maillage paramétrable</li> </ul>                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>☁ Tout type de ciel</li> </ul>                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>💡 Éclairements horizontaux, verticaux, cylindriques, ... [lux]</li> <li>☀ Facteurs de lumière du jour (%)</li> <li>🔦 Luminances (cd/m<sup>2</sup>)</li> <li>🔦 Visualisation des scènes</li> </ul> |
| <div>  <b>Modélisation</b> : capacités géométriques et de maillage </div> <div>  <b>Types de ciel</b> : modèles de ciel et conditions d'éclairement </div> <div>  <b>Résultats</b> : sorties numériques et visuelles produites par le logiciel </div> |                  |                                                         |                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                          |

### 3.1.2.1. Ecotect

Ecotect (v 5.5) est un logiciel de conception Haute Qualité Environnementale (HQE) destiné aux architectes, qui allie une vaste gamme de simulations et d'analyses pour bien comprendre les performances du bâtiment. C'est un logiciel de simulation simple et complet qui associe un modèleur 3D avec des analyses solaire, thermique, acoustique et de coût. Ecotect permet aux concepteurs de travailler facilement en 3D et d'utiliser tous les outils nécessaires à la gestion efficace de l'énergie. "Ecotect 5.5" offre plusieurs avantages, c'est un outil facile dans sa manipulation et sa compréhension, il permet de guider le processus de conception et aide les concepteurs à prendre les bonnes décisions dès la première phase d'esquisse, en ce qui concerne la localisation de la construction, sa forme globale, son orientation, les matériaux utilisés pour l'extérieur ainsi que la taille des fenêtres et leur emplacement...etc. Un autre avantage important est qu'il est possible d'analyser la situation d'éclairage durant toute l'année tout simplement en attribuant les paramètres de simulation (comme l'emplacement, la date, l'heure, l'état du ciel etc).

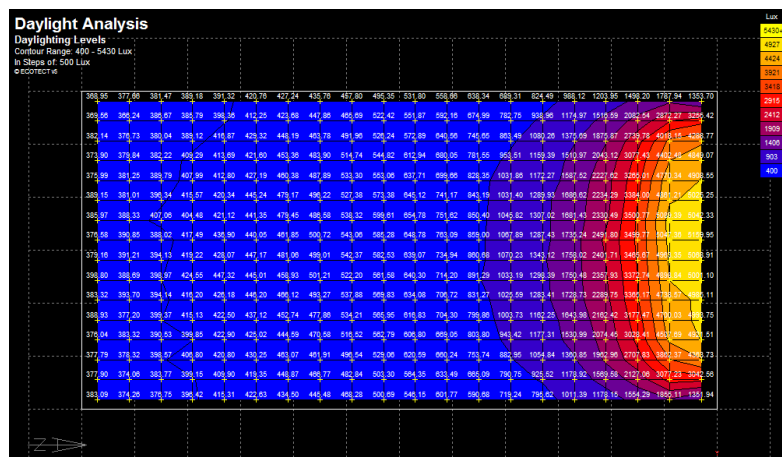


**Figure 39.** Résultat de la simulation de la lumière sous Ecotect (Source : Daich, 2011)

À partir d'Ecotect, nous pouvons importer des données de 3D Studio (.3DS .ASC .PRJ), Autocad (.DXF), EnergyPlus (.IDF), Windows Bitmap (.BMP). Comme nous pouvons faire des exportations vers DOE-2 (.INP), AIOLOS (.PPA), VRML (.WRL), ESP-r (.CFG), WinAir4 CFD (.GEO) ; Radiance (.RAD .OCT), EnergyPlus (.IDF), Autocad (.DXF). Ecotect offre six fonctions principales :

- La fonction Visual Impact, aide à analyser les angles de projection, les obstructions et les composants verticaux pour n'importe quel point ou surface.
- La fonction Solar Radiation Analysis, "Ecotect 5.5" permet de visualiser l'incidence des radiations solaires sur les fenêtres et les surfaces calculées pour chaque saison.

- La fonction Shadow and Reflétions : permet les simulations d'ombres, de réflexions et indique la position du soleil et l'ensoleillement du projet comme elle montre comment la lumière entre par les fenêtres et se déplace dans l'espace.
- La fonction Daylight, permet de calculer les détails de l'ensoleillement, les facteurs d'éclairage naturels : les niveaux d'éclairement (lux), le facteur de lumière du jour (%), les réflexions intérieures et extérieures (%) à n'importe quel point du modèle, ainsi que les composantes du ciel. Selon le type de la grille (verticale ou horizontale), la fonction affiche les résultats en 2D et/ou en 3D. Elle simule aussi les économies potentielles qu'offre la conception axée sur l'éclairage naturel. Notre travail se base sur cette fonction.
- La fonction Thermal performance, permet de calculer les charges de chauffages et de climatisation pour toute types de zones, quelques soient leurs formes. Il analyse également les changements thermiques dû à l'occupation des bâtiments, aux apports internes, à l'infiltration, ainsi qu'aux différents équipements.

#### **3.1.2.2. DIAL LUX**

Le logiciel DIALUX est devenu un outil gratuit incontournable, qui permet non seulement de sélectionner ses futurs luminaires en fonction de nombreux paramètres, mais il en plus il vous assure de réaliser de vraies économies d'énergie en vous aidant à optimiser vos nouvelles solutions d'éclairage. Il est souvent utilise pour concevoir, calculer et visualiser des études d'éclairage très professionnellement pour un local simple, étages complets, bâtiments et scènes d'extérieur. DIALUX permet de calculer l'éclairement naturel, pour trois types de ciel, parmi lequel le ciel couvert CIE. DIALUX peut être utilisé à toutes les étapes du projet mais comme il n'inclut qu'un outil de modélisation géométrique simple, il est mieux adapté au stade de l'avant-projet. Ce logiciel offre la possibilité de modéliser des géométries relativement complexes ainsi qu'une reprise de la géométrie utilisée pour un calcul d'éclairage artificiel valide par l'AFE. Il permet également de lancer le calcul sur plusieurs locaux simultanément.

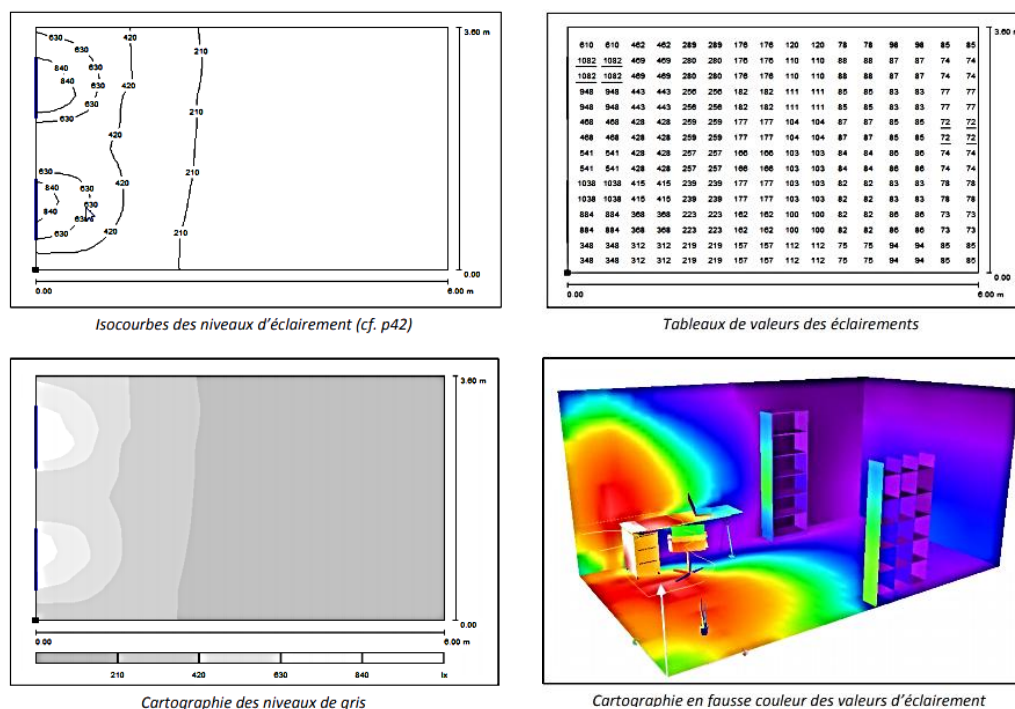


**Figure 40.** DIAL LUX output (source : Haubruge et Bodart, 2012)

Par contre Dial lux présente quelque lacune telle que l'ergonomie de la saisie non intuitive et parasitée par des paramètres non impactant comme il ne permet pas de modéliser la géométrie circulaire et les seconds jours. Le modèle géométrique est réalisé dans le software mais on peut importer des fichiers .dwg ou .dxf pour servir de base au dessin.

### 3.1.2.3. Dial+

DIAL+ offre une très bonne ergonomie et temps de calcul rapide. Il permet de soit lancer des simulations d'éclairage (RADIANCE) ou de calculer les charges de chauffage et de refroidissement à l'échelle d'un local. Le module permet de produire des rapports qui incluent les résultats suivants :

- Facteurs de lumière du jour
- Autonomie dynamique diffuse (% et heures)
- Autonomie pour Minergie-Éco (Suisse)
- Valeurs d'éclairage en éclairage électrique
- Consommation annuelle d'électricité d'éclairage (SIA 380/4, Minergie)
- Diagramme solaire incluant les obstructions extérieures.
- Etudes d'ombrage (facteur d'ensoleillement, fraction de ciel vu)

- Le module de refroidissement donne accès aux modules suivants : Charges de refroidissement et de chauffage (EN 15251 EN 15255, EN 15265 and ISO 13791, SIA 382/1 SIA 382/2)
- Débits d'air dus à la ventilation naturelle (Modèle de Cockroft)

Grâce à sa rapidité de simulation et sa simplicité, DIAL+ est particulièrement adapté à la réalisation d'études paramétriques, ce qui est très intéressant au stade de l'avant-projet. DIAL+ permet de prendre des décisions précoces à l'échelle du local et de les appliquer au reste du bâtiment. DIAL+ est une interface très intuitive qui traite de l'optimisation des charges énergétiques, à l'échelle du local. L'interface a été conçue de manière à permettre à un utilisateur non expert de décrire facilement les paramètres des locaux. Il peut donc être utilisé par des architectes et des ingénieurs. Il est aussi bien adapté à des objectifs pédagogiques. Cependant, l'utilisation de toutes ses caractéristiques (éclairage et thermique) suppose que l'utilisateur a une connaissance minimale du comportement d'un bâtiment. DIAL+ contient un modeler 3D simplifié qui permet de modéliser des locaux rectangulaires, en forme de L ou de trapèzes, ayant un toit plat, à simple ou double versant. Des objets opaques ou transparents peuvent être ajoutés à l'intérieur des locaux traités. Le temps moyen requis pour décrire tous les paramètres d'un local classique est de moins de 10 minutes. Les résultats de simulation sont affichés sous forme de plans 2D et de graphes (FLJ, autonomie, éclairage, etc.) sur le plan de travail ou sur les murs.



**Figure 41.** Simulation sous DIAL+ : A gauche, résultat de FLJ ; à droite, résultat de daylight autonomie (source : <http://www.behi.fr/outils-societe>)

### 3.1.2.4. ReluxPro

ReluxPro propose une interface conviviale qui fournit des possibilités d'importation puissantes des plans d'architecture 2D ou de modèles 3D. ReluxPro possède une base de données de luminaires importante, permet de définir précisément la position des luminaires

dans le bâtiment et donne rapidement des résultats sous forme de rendus. ReluxPro permet aussi de calculer des niveaux d'éclairement. Pour chaque zone d'un bâtiment, les niveaux d'éclairement et les valeurs d'uniformité  $g_1$  et  $g_2$  peuvent être obtenus. Il est dès lors possible d'obtenir un facteur de lumière du jour dans les locaux d'un bâtiment et de prédire la distribution de lumière naturelle dans le local modélisé. Des valeurs de luminance peuvent aussi être calculées. Il est destiné au secteur des professionnels de la construction, tels que les architectes et les concepteurs d'éclairage familiarisés avec les outils de conception informatique. ReluxPro inclut des fonctionnalités de modélisation 3D très faciles d'utilisation. Il est possible de modéliser les meubles et les luminaires, à partir d'une vaste base de données. Les ouvertures de fenêtre ainsi que d'autres éléments tels que des portes, peuvent être ensuite définies dans les murs. Relux présente d'autres avantages tels que : une bonne ergonomie, la possibilité de modéliser des géométries ayant des formes complexes et de lancer plusieurs locaux simultanément et un temps de calcul assez rapide. Relux trouve sa limite dans l'absence de message d'erreur en cas de problème dans la modélisation ainsi que la différenciation difficile des paramètres impactant le calcul d'éclairage naturel ou d'éclairage artificiel.

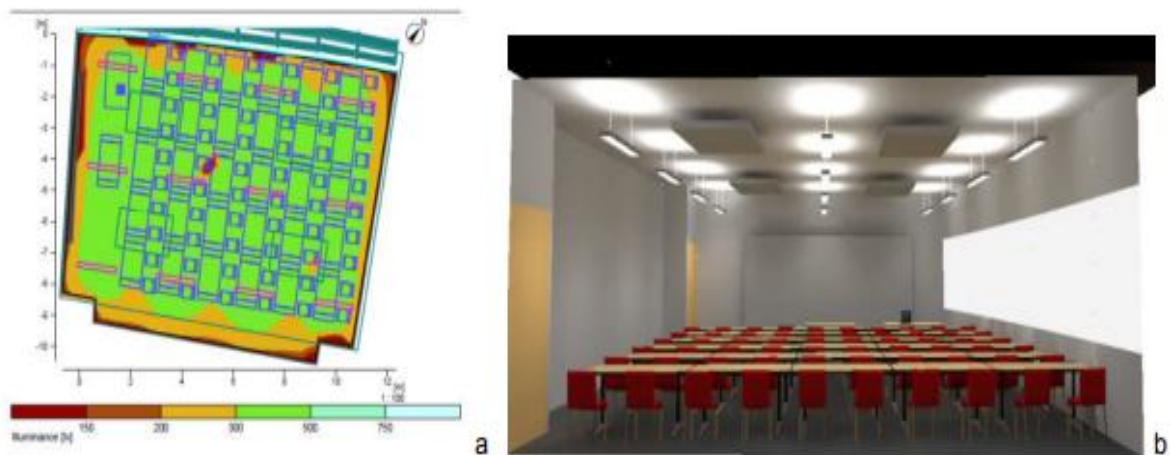


**Figure 42.** Simulation sous RELUX : à gauche, lignes de contours de l'éclairage artificiel ; à droite, un rendu d'une salle sous Relux (source : Yu et al, 2014)

### 3.1.2.5. IES VE

« Virtual Environment » est une suite intégrée d'applications liées par une interface commune et un modèle simple d'intégration de données (IDM). Cela signifie que les données utilisées pour une des applications peuvent être utilisées par d'autres. Les modèles proposés sont par exemple

« ApacheSim » pour la simulation thermique, « Radiance » pour l'éclairage naturel et « SunCast » pour l'analyse des ombrages. L'application de modélisation géométrique 3D est « ModelIT ». ModelIT permet à l'utilisateur de créer les modèles 3D requis par les autres composants au sein de la « Virtual environment ». ModelIT est conçu pour permettre d'intégrer les niveaux de complexité appropriés au modèle global. A l'étape de pré-design ou lors de l'étude de faisabilité, des modèles basiques peuvent être générés à partir de croquis en utilisant une variété d'outils de modélisation simples, de manière à mener des évaluations préliminaires ou des études comparatives. Similairement, en fin de processus de conception, les fichiers .dxf représentant précisément le bâtiment peuvent être importés dans Model IT, de manière à servir de base pour une représentation 3D des espaces. Le module d'interface pour RADIANCE, Radiance IES, est intégré dans « Virtual Environment ». Il existe deux types d'images créées par Radiance ; les rendus de luminances et d'éclairements. Un rendu d'éclairement peut être utilisé afin de regarder les valeurs en lux et de générer des iso contours en lux ou en Facteur de Lumière du Jour. Un rendu en luminance est utilisé pour évaluer des indices d'éblouissement ou en tant qu'image photo-réalistes. L'interface est conçue de manière à rendre la création d'images la plus facile possible, en se basant sur des hypothèses par défaut quand c'est possible.

### 3.1.2.6. Radiance

Radiance est un outil avancé d'analyse, de simulation et de visualisation de la lumière, largement reconnu dans le domaine de l'éclairage naturel et artificiel. Basé sur des modèles géométriques tridimensionnels (3D), il permet d'effectuer des calculs photométriques physiquement fiables et de produire des rendus visuels de haute qualité. Les résultats obtenus concernent notamment la luminance, l'éclairement et la distribution de la lumière, présentés sous forme de valeurs numériques, d'images réalistes ou encore de représentations en « fausses couleurs » et d'isolignes facilitant l'interprétation et l'analyse des performances lumineuses des espaces étudiés. Considéré comme l'un des logiciels de référence dans le domaine de la simulation de l'éclairage naturel, Radiance permet de réaliser des simulations sous différentes conditions de ciel, telles que le ciel clair, uniforme ou couvert. Il intègre également le modèle de Perez, qui offre une représentation plus réaliste des conditions lumineuses naturelles en fonction des données climatiques locales. Un module complémentaire permet en outre de modéliser les quinze types de ciel normalisés par la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), améliorant ainsi la précision des analyses lumineuses dans diverses situations climatiques et géographiques. Le modèle de Perez constitue également la base des calculs annuels de lumière naturelle réalisés à

partir des données météorologiques et climatiques spécifiques au site étudié. Cette approche permet d'évaluer les performances lumineuses d'un bâtiment sur une année complète et d'analyser plusieurs indicateurs de confort visuel et énergétique. Des outils supplémentaires sont disponibles pour le calcul d'indices spécifiques, notamment les indices d'éblouissement visuel, permettant d'évaluer le confort des occupants et la qualité de l'environnement intérieur. Grâce à sa précision et à sa flexibilité, Radiance est largement utilisé par les architectes, les ingénieurs, les concepteurs lumière et les chercheurs. Il leur permet de prédire les niveaux d'éclairement, la distribution de la lumière ainsi que l'apparence visuelle des espaces avant même leur réalisation. Le logiciel sert également à tester et à évaluer de nouveaux systèmes ou produits d'éclairage, qu'ils soient naturels ou artificiels. Utilisable à toutes les étapes du processus de conception architecturale, il offre la possibilité de modéliser une grande variété de géométries spatiales, de matériaux et de configurations lumineuses afin d'optimiser les performances énergétiques et le confort visuel des bâtiments. Radiance constitue aujourd'hui l'un des outils les plus performants et les plus utilisés dans le domaine de la simulation de l'éclairage naturel et artificiel. Développé initialement pour des applications de recherche avancée, ce logiciel est devenu une référence internationale dans les domaines de l'architecture, de l'ingénierie du bâtiment, du confort visuel et de l'efficacité énergétique. Sa capacité à reproduire avec précision le comportement physique de la lumière permet d'obtenir des résultats fiables et scientifiquement validés, aussi bien pour des études académiques que pour des projets professionnels de grande envergure. Le principe de fonctionnement de Radiance repose sur la modélisation géométrique tridimensionnelle des espaces intérieurs et extérieurs. À partir de ces modèles numériques, le logiciel effectue des calculs complexes de propagation de la lumière en tenant compte des propriétés optiques des matériaux, des réflexions multiples, de la transmission lumineuse des vitrages, de l'absorption ainsi que des conditions climatiques et atmosphériques. Cette approche permet de reproduire avec un haut niveau de réalisme les phénomènes lumineux observés dans les environnements bâtis. Le logiciel génère différents types de résultats photométriques et visuels. Il peut produire des cartes d'éclairement, des distributions de luminance, des images photoréalistes et des représentations graphiques avancées sous forme de fausses couleurs, d'isolignes ou de diagrammes analytiques. Ces représentations facilitent la compréhension des performances lumineuses d'un espace et permettent d'identifier les zones insuffisamment éclairées ou, au contraire, soumises à un excès de lumière ou à des risques d'éblouissement. L'un des principaux avantages de Radiance réside dans sa capacité à simuler différents modèles de ciel. Les utilisateurs peuvent travailler avec des ciels standards tels que le ciel clair, le ciel couvert ou le



## 3.2. SIMULATION THERMIQUE ET ENERGETIQUE

### Introduction

Les outils de simulation thermique occupent aujourd'hui une place essentielle dans l'ensemble des métiers liés à la conception, à l'évaluation et à l'exploitation des bâtiments. Avec l'évolution rapide des technologies numériques, les logiciels d'analyse énergétique deviennent de plus en plus performants, intégrés et accessibles, offrant ainsi aux concepteurs, architectes, ingénieurs et chercheurs des possibilités avancées d'étude et d'optimisation des performances des bâtiments. Cette évolution s'accompagne d'une nécessité croissante de mieux comprendre le comportement thermique et énergétique des constructions, notamment dans le contexte actuel marqué par les enjeux de transition énergétique, de réduction des consommations et d'amélioration du confort des occupants. Les logiciels de simulation énergétique constituent aujourd'hui un outil d'aide à la décision incontournable. Ils permettent d'évaluer avec précision les besoins énergétiques d'un bâtiment, d'analyser les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur, ainsi que d'estimer les consommations liées au chauffage, à la climatisation, à la ventilation et à l'éclairage. Grâce à ces outils, il devient possible d'identifier les paramètres influençant les performances énergétiques, tels que l'orientation du bâtiment, les matériaux de construction, l'isolation thermique, les ouvertures, les systèmes techniques ou encore les conditions climatiques locales. Les résultats obtenus facilitent ainsi la mise en œuvre de solutions optimales visant à réduire les dépenses énergétiques, améliorer l'efficacité énergétique et limiter l'impact environnemental des bâtiments.

### 3.2.1. Historique des environnements de simulation énergétique des bâtiments

Selon les statistiques publiées par le Département de l'Énergie des États-Unis en 2015, plus de 450 logiciels dédiés à la simulation énergétique et environnementale des bâtiments ont été répertoriés sur la plateforme spécialisée Building Energy Software Tools Directory (U.S. Department of Energy, 2015). Une grande partie de ces outils a été développée afin de répondre aux problématiques croissantes liées aux performances thermiques et énergétiques des bâtiments, notamment dans le contexte de la maîtrise de la consommation énergétique, de l'amélioration du confort des occupants et de la réduction des impacts environnementaux (Clarke, 2001 ; Hensen & Lamberts, 2011). Ces outils de simulation se présentent sous différentes formes et niveaux de complexité. Certains prennent la forme de simples feuilles de calcul permettant des estimations rapides, tandis que d'autres sont conçus comme de véritables plateformes numériques dotées d'interfaces graphiques avancées, capables de réaliser des simulations dynamiques complexes (Crawley et al., 2008). Leur précision, leurs méthodes de calcul ainsi que les résultats fournis varient considérablement selon les objectifs visés et les modèles physiques intégrés (Mahdavi, 2004). Les logiciels de simulation énergétique peuvent ainsi répondre à plusieurs finalités. Certains servent principalement à fournir des tendances générales sur le comportement thermique d'un bâtiment, d'autres sont utilisés pour optimiser l'enveloppe architecturale, améliorer l'isolation thermique, analyser les performances des matériaux ou encore dimensionner les équipements de chauffage, de climatisation, de ventilation et d'éclairage (Clarke, 2001 ; Crawley, 2001). D'autres outils plus avancés permettent également d'évaluer le confort thermique, la qualité de l'air intérieur, les consommations énergétiques annuelles, les émissions de gaz à effet de serre ainsi que l'intégration des énergies renouvelables (Wetter, 2011 ; Zhai & Chen, 2005). La figure 45 illustre l'évolution des environnements de modélisation énergétique des bâtiments ainsi que l'intégration progressive de nouveaux phénomènes physiques et environnementaux dans les outils de simulation. Cette évolution technologique permet de distinguer quatre grandes générations de logiciels de simulation énergétique (Augenbroe, 2002). La première génération était principalement consacrée au calcul du bilan thermique et énergétique global des bâtiments à travers des méthodes simplifiées et des approches statiques. Ces outils servaient essentiellement à évaluer les besoins énergétiques de base et à établir des bilans thermiques manuels (Clarke, 2001). La deuxième génération, développée entre 1975 et 1985, marque une avancée importante grâce à l'introduction de la modélisation en régime transitoire et des modèles monozones. Cette période se caractérise par la réalisation de simulations annuelles avec un pas de temps horaire, l'utilisation de l'analogie thermique-électrique pour représenter les transferts thermiques, ainsi

qu'une programmation séquentielle permettant une meilleure précision des calculs (Negrao, 1995 ; Crawley et al., 2008). La troisième génération, apparue entre 1985 et 1995, se distingue par une approche plus globale intégrant simultanément les bilans massiques et énergétiques. Elle introduit des modèles quasi-statiques et systémiques des systèmes énergétiques, ainsi qu'une modélisation causale et multizone permettant de représenter avec davantage de réalisme les interactions thermiques entre les différents espaces du bâtiment (Hensen & Lamberts, 2011). Enfin, la quatrième génération, qui continue d'évoluer depuis les années 1990 jusqu'à aujourd'hui, est caractérisée par des modèles multiphysiques et multi échelles intégrant non seulement le bâtiment, mais également son environnement urbain et territorial (Wetter, 2011). Ces outils permettent le couplage des réseaux de ventilation, des circuits de distribution de chaleur et des systèmes énergétiques intelligents.

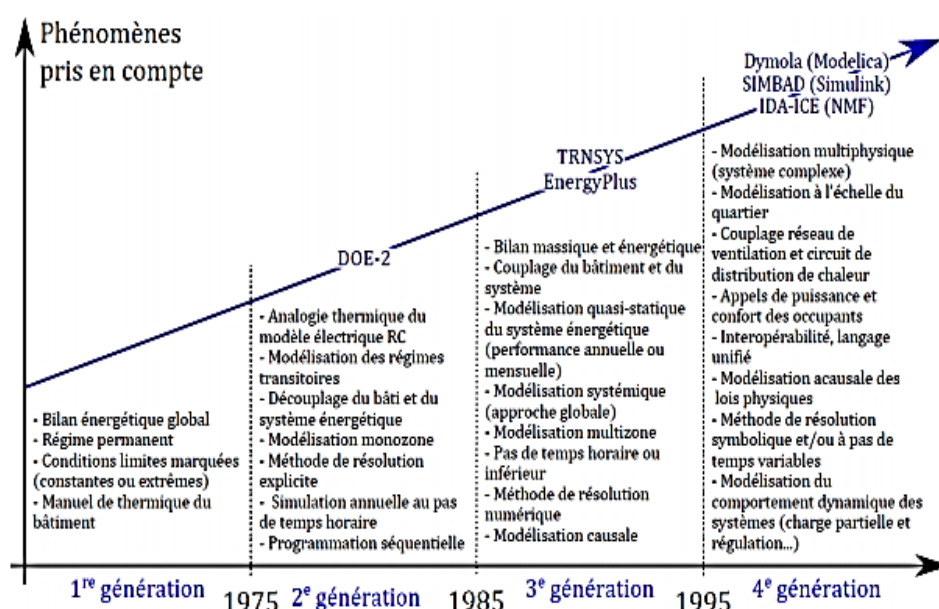


**Figure 44.** Historique des environnements de simulation énergétique des bâtiments (H. Blervaque, 2014.)

Ils prennent également en compte le comportement dynamique des équipements, les interactions entre les bâtiments et les conditions climatiques extérieures, ainsi que les approches de simulation à l'échelle du quartier et de la ville durable (Zhai & Chen, 2005 ; Augenbroe, 2002). Ainsi, l'évolution des logiciels de simulation énergétique traduit le passage progressif d'approches simplifiées vers des modèles numériques intégrés, capables d'analyser avec précision le comportement thermique, énergétique et environnemental des bâtiments modernes dans une perspective de développement durable et d'efficacité énergétique (Crawley et al., 2008 ; Clarke, 2001).

### 3.2.1.1. PLEIADES COMFIE (<http://www.izuba.fr>)

Le logiciel PLEIADES + COMFIE est un outil de simulation thermique dynamique développé pour modéliser et analyser le comportement énergétique des bâtiments. Il constitue aujourd'hui l'un des logiciels les plus utilisés dans les bureaux d'études thermiques et environnementaux, notamment dans le domaine de la performance énergétique des bâtiments et de l'évaluation du confort thermique des occupants. Le module PLEIADES représente l'interface utilisateur du logiciel, permettant la saisie des données, la gestion des projets et la visualisation des résultats, tandis que COMFIE constitue le moteur de calcul thermique dynamique développé depuis les années 1990 par le laboratoire PEREN de l'École des Mines de Paris (Peuportier & Blanc Sommereux, 1990). Ce moteur de simulation repose sur des modèles physiques permettant d'évaluer les transferts thermiques, les besoins énergétiques et les performances thermiques des bâtiments en tenant compte des conditions climatiques extérieures, des caractéristiques de l'enveloppe et des scénarios d'occupation. Le logiciel peut être associé à plusieurs modules complémentaires afin d'élargir ses capacités d'analyse et d'optimisation. Il peut notamment être couplé à ALCYONE pour la saisie géométrique et la visualisation tridimensionnelle du bâtiment. Ce module facilite la modélisation architecturale des espaces ainsi que l'analyse des apports solaires et des masques environnementaux. Par ailleurs, METEOCALC permet la génération, le traitement et la mise en forme des fichiers météorologiques nécessaires aux simulations thermiques réalisées par COMFIE. Ces données climatiques jouent un rôle essentiel dans l'évaluation des performances énergétiques des bâtiments selon différentes conditions climatiques locales et saisonnières. Le logiciel peut également être couplé à nova EQUER afin de réaliser des analyses environnementales plus globales intégrant les impacts environnementaux des matériaux, la consommation d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les analyses de cycle de vie des bâtiments. L'un des principaux avantages de PLEIADES + COMFIE réside dans sa simplicité de prise en main, son interface relativement intuitive et sa rapidité d'exécution des simulations thermiques dynamiques. Ces caractéristiques en font un outil particulièrement apprécié par les bureaux d'études techniques, les architectes et les ingénieurs spécialisés dans la conception énergétique des bâtiments. Il permet notamment d'effectuer rapidement des comparaisons entre différentes variantes architecturales, constructives et énergétiques afin d'optimiser les performances thermiques du bâtiment dès les premières phases de conception. Cependant, malgré ses nombreuses fonctionnalités et sa grande efficacité opérationnelle, ce logiciel présente certaines limites dans le cadre de la recherche scientifique avancée. En effet, l'accès limité au code source et aux modèles internes de calcul réduit les

possibilités de modification, de personnalisation et de validation approfondie des algorithmes utilisés. Cette contrainte rend le logiciel moins flexible pour les travaux de recherche nécessitant le développement de modèles spécifiques ou l'intégration de nouvelles approches physiques et numériques. Ainsi, PLEIADES + COMFIE représente aujourd'hui un outil performant et largement utilisé dans le domaine de la simulation thermique dynamique des bâtiments, particulièrement adapté aux applications professionnelles et aux études de performance énergétique, tout en présentant certaines limites pour les applications de recherche nécessitant une ouverture complète des modèles de calcul.

### **3.2.1.2. EnergyPlus (<https://energyplus.net>)**

Le logiciel EnergyPlus est un outil libre et performant dédié à l'analyse des performances thermiques et énergétiques des bâtiments. Développé par le U.S. Department of Energy, il constitue aujourd'hui l'un des moteurs de simulation énergétique les plus utilisés dans le domaine de la recherche scientifique et de l'ingénierie du bâtiment durable. EnergyPlus est issu de l'intégration et de l'amélioration de deux logiciels historiques de simulation énergétique, à savoir BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) et DOE-2, dont il reprend plusieurs approches de calcul tout en introduisant des fonctionnalités plus avancées et plus flexibles (Crawley et al., 2001). EnergyPlus permet de réaliser des simulations thermiques dynamiques détaillées en tenant compte des interactions complexes entre l'enveloppe du bâtiment, les systèmes énergétiques, les conditions climatiques extérieures et le comportement des occupants. Contrairement aux générations précédentes de logiciels, il intègre directement des modules spécifiques destinés à la modélisation des équipements techniques tels que les systèmes de chauffage, de ventilation, de climatisation, d'éclairage et de production d'eau chaude sanitaire dans le bilan énergétique global du bâtiment. L'une des principales caractéristiques d'EnergyPlus réside dans sa capacité à effectuer une modélisation multizone avancée. Le logiciel permet de subdiviser le bâtiment en plusieurs zones thermiques interconnectées afin d'analyser avec précision les échanges de chaleur et de masse entre les différents espaces intérieurs. Il offre également la possibilité de prendre en compte la stratification thermique dans les grands volumes, ce qui représente un avantage important pour l'étude des bâtiments complexes tels que les halls, atriums, salles de spectacles ou bâtiments industriels (Clarke, 2001). Par ailleurs, EnergyPlus propose des fonctionnalités avancées de simulation aérodynamique permettant de modéliser les mouvements d'air naturels ou mécaniques à l'intérieur du bâtiment. Le logiciel peut notamment réaliser des couplages avec des systèmes de ventilation naturelle, intégrant le contrôle automatique des ouvrants en fonction des conditions climatiques extérieures, de la température

intérieure ou des besoins de confort thermique. Cette capacité de simulation dynamique favorise l'analyse des stratégies bioclimatiques et des approches de ventilation passive visant à réduire les consommations énergétiques (Wetter, 2011). Le logiciel permet également le suivi et l'évaluation des consommations d'eau, l'intégration des énergies renouvelables, l'analyse de la qualité de l'air intérieur ainsi que l'étude détaillée des performances environnementales des bâtiments. De plus, EnergyPlus peut être interfacé avec plusieurs outils externes de modélisation géométrique et de conception architecturale utilisant des standards d'échange de données issus des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et du BIM (Building Information Modeling). Il dispose aussi d'une importante base de données météorologiques internationales permettant de réaliser des simulations adaptées à différentes zones climatiques. Cependant, malgré ses nombreuses capacités de calcul et sa grande précision, EnergyPlus présente certaines difficultés d'utilisation, notamment pour les utilisateurs débutants. En effet, le logiciel fonctionne principalement comme un moteur de calcul nécessitant la manipulation de fichiers textes relativement complexes pour la définition des paramètres de simulation. Cette approche peut rendre son utilisation moins intuitive comparativement aux logiciels disposant d'interfaces graphiques intégrées. Pour pallier cette difficulté, plusieurs interfaces graphiques ont été développées par des entreprises et des organismes spécialisés afin de faciliter la modélisation et l'exploitation des simulations réalisées avec EnergyPlus. Parmi les interfaces les plus connues figure DesignBuilder, qui permet une modélisation 3D simplifiée du bâtiment ainsi qu'une gestion plus accessible des paramètres thermiques et énergétiques. Ainsi, grâce à sa précision, sa flexibilité et ses nombreuses fonctionnalités avancées, EnergyPlus constitue aujourd'hui une référence mondiale dans le domaine de la simulation thermique dynamique et de l'analyse énergétique des bâtiments, aussi bien pour les applications professionnelles que pour les travaux de recherche scientifique.

### **3.2.1.3. TRNSYS (<http://www.trnsys.com>)**

Le logiciel TRNSYS (Transient System Simulation Tool) est un environnement de simulation dynamique développé à partir de 1975 dans le cadre d'une collaboration internationale réunissant l'Université du Wisconsin, l'entreprise TESS (Thermal Energy System Specialists), le groupe TransSolar en Allemagne ainsi que le CSTB en France. Il s'agit d'un outil largement utilisé pour la modélisation et l'analyse des systèmes énergétiques complexes, notamment dans le domaine du bâtiment et des énergies renouvelables. TRNSYS se distingue par sa capacité à simuler des systèmes thermiques dynamiques de nature très variée, incluant les bâtiments, les systèmes de

chauffage, de climatisation, de ventilation, les installations solaires, ainsi que les systèmes hybrides multi-énergies. Son architecture repose sur une approche modulaire dite « par schéma-bloc », permettant de décomposer un système complexe en plusieurs sous-modèles interconnectés. Cette approche facilite la compréhension, la construction et la modification des modèles, tout en offrant une grande flexibilité dans la représentation des phénomènes physiques. L'un des principaux atouts de TRNSYS réside dans son caractère ouvert et extensible. En effet, l'environnement permet aux utilisateurs de développer et d'intégrer leurs propres composants (appelés "Types"), ce qui rend possible la simulation de technologies innovantes ou encore inexistantes sur le marché. Cette flexibilité en fait un outil particulièrement adapté à la recherche scientifique, au développement technologique et à l'étude de systèmes énergétiques avancés. Le logiciel peut également être couplé à plusieurs outils externes afin d'enrichir ses capacités de simulation et d'optimisation. Il peut notamment être interfacé avec CONTAM pour l'analyse des transferts d'air et de la qualité de l'air intérieur, avec MATLAB pour le traitement numérique avancé, avec Excel pour la gestion et l'exploitation des données, avec Fluent pour la dynamique des fluides computationnelle, ainsi qu'avec GenOpt pour l'optimisation des performances énergétiques des systèmes simulés. Cependant, malgré ses nombreux avantages, TRNSYS présente également certaines limites. Son apprentissage peut s'avérer relativement long, en raison de la complexité de son environnement modulaire et de la richesse de ses fonctionnalités. De plus, bien que ses interfaces graphiques permettent de gérer un grand nombre de paramètres et de composants, cette richesse peut parfois nuire à l'efficacité dans un contexte opérationnel, notamment pour les bureaux d'études recherchant des outils plus rapides et plus intuitifs. Ainsi, TRNSYS demeure un outil de référence dans le domaine de la simulation dynamique des systèmes énergétiques, particulièrement apprécié pour sa flexibilité, son extensibilité et sa capacité à représenter des systèmes complexes et innovants, tout en restant plus exigeant en termes de maîtrise technique et de temps d'apprentissage.

### 3.2.1.4. ESP-r (<http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>)

Le logiciel ESP-r, développé par l'Université de Strathclyde à Glasgow depuis 1974, constitue un environnement de simulation énergétique des bâtiments particulièrement complet et orienté recherche. Il est devenu open source à partir de 2002, ce qui a renforcé son utilisation dans les milieux académiques et scientifiques, notamment pour l'étude des phénomènes physiques complexes liés au bâtiment. ESP-r repose sur une architecture modulaire permettant de modéliser de manière détaillée l'enveloppe du bâtiment, les systèmes énergétiques associés ainsi que leurs

stratégies de contrôle et de gestion. Grâce à sa bibliothèque étendue de composants physiques, les utilisateurs peuvent représenter avec précision différents types de matériaux, systèmes techniques et configurations architecturales. L'un des points forts du logiciel est également la possibilité de développer et d'intégrer de nouveaux modèles, ce qui en fait un outil particulièrement flexible pour la simulation de technologies innovantes ou émergentes. Le logiciel permet de simuler de manière couplée les transferts de chaleur, d'air et d'humidité à l'échelle du bâtiment. Il offre ainsi une analyse approfondie du comportement hygrothermique des constructions, ainsi que des performances thermiques globales. En complément, ESP-r permet également d'évaluer d'autres aspects du confort intérieur, notamment les performances visuelles (éclairage naturel) et acoustiques, ce qui en fait un outil multiphysique complet adapté à l'analyse globale du bâtiment. L'une des caractéristiques importantes d'ESP-r est sa capacité à utiliser une approche multizone avancée pour la modélisation des transferts thermiques et aérauliques entre les différentes zones du bâtiment. Il peut également intégrer des approches de type CFD (Computational Fluid Dynamics) pour analyser plus finement les écoulements d'air et les phénomènes de convection à l'intérieur des espaces. De plus, le logiciel permet l'utilisation de pas de temps inférieurs à l'heure, offrant ainsi une résolution temporelle fine particulièrement utile pour les études dynamiques détaillées. Grâce à ces fonctionnalités avancées, ESP-r est particulièrement adapté aux travaux de recherche et de développement dans le domaine de la physique du bâtiment et de la simulation énergétique. En revanche, sa complexité, sa courbe d'apprentissage relativement élevée et son interface moins orientée vers la productivité rendent son utilisation moins adaptée aux bureaux d'études recherchant des outils rapides, intuitifs et directement opérationnels. Ainsi, ESP-r se positionne comme un outil de référence pour la recherche scientifique en simulation énergétique, offrant une grande richesse de modélisation et une flexibilité importante, au prix d'une exigence technique élevée et d'une prise en main plus complexe.

### **3.2.1.5. Dymola (<http://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola>)**

Dymola, pour Dynamic Modeling Laboratory, est un environnement dédié à la modélisation et à la simulation de systèmes complexes. Développé par Dassault Systèmes, il permet de modéliser de manière pratique des systèmes dynamiques complexes multiphysiques. Historiquement utilisé pour les constructions aéronautiques et automobiles, ce logiciel dispose maintenant de bibliothèques dans de nombreux domaines avec notamment des composants pour la mécanique, l'hydraulique, l'électricité, la robotique ou encore la thermique du bâtiment.

En effet, l'éditeur graphique permet de modéliser des systèmes de façon intuitive et simple lorsque les bibliothèques existantes sont exploitées. Par ailleurs, l'environnement Dymola étant complètement ouvert, les utilisateurs peuvent facilement créer de nouveaux composants, soit en complétant des composants existants, soit en les construisant de zéro. La bibliothèque Buildings, développée par le Lawrence Berkeley National Laboratory, est un exemple de bibliothèque libre élaborée pour la simulation dynamique de modèles pour la thermique et l'énergétique du bâtiment, mais aussi pour les systèmes de contrôle. Cet outil peut également être couplé à d'autres outils comme EnergyPlus, Matlab ou GenOpt.



## Introduction

Par le passé, l'évaluation de l'environnement sonore intérieur était principalement réalisée à l'aide de maquettes physiques conçues à différentes échelles, selon les objectifs de l'étude et la nature de l'espace à analyser. Ces maquettes permettaient d'étudier le comportement des ondes sonores, les phénomènes de réverbération, de diffusion et d'absorption acoustique, ainsi que l'impact de la géométrie architecturale sur la qualité sonore des lieux d'écoute. Bien que cette méthode ait apporté des résultats intéressants, elle demeurait coûteuse, longue à mettre en œuvre et parfois limitée en précision et en flexibilité. Avec l'évolution des technologies numériques et l'apparition de logiciels de simulation acoustique de plus en plus performants, l'analyse de l'environnement sonore des bâtiments et des espaces d'écoute s'effectue désormais principalement à l'aide d'outils informatiques spécialisés. Ces logiciels permettent de modéliser avec précision la géométrie des espaces intérieurs, les propriétés acoustiques des matériaux, ainsi que les différentes sources sonores. Grâce à des algorithmes avancés de calcul et de propagation sonore, ils offrent la possibilité de prédire le comportement acoustique d'un espace avant même sa réalisation. Les simulations acoustiques numériques constituent aujourd'hui un outil essentiel pour les architectes, ingénieurs et acousticiens, car elles permettent d'évaluer plusieurs paramètres acoustiques tels que le temps de réverbération, l'intelligibilité de la parole, la clarté sonore, la diffusion du son et le confort acoustique global. Elles facilitent également l'optimisation de la forme architecturale des lieux d'écoute ainsi que la répartition et le choix des matériaux absorbants, réfléchissants ou diffusants afin d'obtenir un équilibre sonore performant et adapté à la fonction du bâtiment.

### 3.3.1. Logiciels de simulation acoustique

La prévision des performances des produits et systèmes de construction pour l'isolation acoustique nécessite souvent une approche basée sur des calculs intensifs, ce qui rend son application difficile pour la plupart des praticiens de l'acoustique. Plusieurs logiciels ont été développés par les spécialistes afin de rendre possible une telle prévision sans aucun effort de calcul pour les utilisateurs, par le biais d'outils pour PC appropriés pour un large éventail de besoins en matière d'ingénierie industrielle. Dans cette section, on va présenter quelques logiciels de calcul et de simulation du phénomène sonore, il s'agit d'AcouBAT, Mithra Sound, Ecotect et CadnaR.

#### 3.3.1.1. AcouBAT

AcouBAT est logiciel de prédiction de la performance acoustique des bâtiments, destiné aux architectes, maîtres d'ouvrages et bureaux d'études. Il permet d'évaluer les isollements acoustiques aux bruits aériens, aux bruits d'impact et aux bruits d'équipement dans les bâtiments. Son domaine d'application concerne les bâtiments d'habitation, les bureaux, les locaux d'enseignement et les établissements de santé. Le logiciel AcouBAT, proposé par le CSTB, présente deux avantages décisifs : c'est l'outil idéal pour respecter la réglementation acoustique applicable aux bâtiments, ainsi que les référentiels Qualitel et HQE • il propose une base de données exhaustive de plus de 2.000 produits et 2.500 performances acoustiques. AcouBAT est capable d'intégrer les basses fréquences aux analyses. Évolutive, la base de données des composants AcouBAT est actualisée chaque année. L'utilisateur du logiciel peut également créer un nouveau composant en toute liberté, avec des performances acoustiques propres. Les composants sont classés en 12 catégories : maçonnerie traditionnelle • refend ou dalle en béton • cloison • séparait léger • revêtement de sol • doublage • porte et fenêtre • équipement technique • toiture • plafond et plancher technique • façade filante • rupteur de pont thermique.

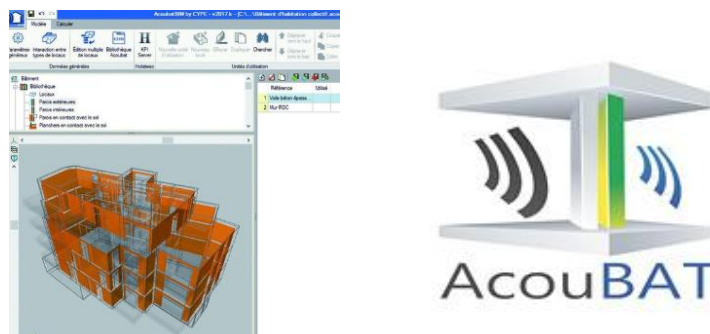


**Figure 45.** Interface graphique du AcouBAT  
(<https://www.actu-environnement.com>)

### 3.3.1.2. Mithra Sound

Mithra Sound est un outil unique capable de restituer les ambiances sonores extérieures de manière très réaliste. Intégrant une visualisation 3D du site modélisé, il permet de coupler les données quantitatives de la simulation à une écoute immersive. Il permet également d'évaluer finement l'impact acoustique d'un aménagement urbain et pour comparer différents scénarios projetés. Les principales fonctions du logiciel :

- Simulation auditive de l'ensemble des sources sonores urbaines, fixes et mobiles, en particulier le bruit du trafic routier et le bruit de tramway.
- Modélisation et gestion dynamique du trafic en tenant compte des feux et des priorités.
- Possibilité de simuler rapidement une configuration urbaine simple par saisie directe ou des modèles urbains complets par import de données SIG.
- Prise en compte des effets de propagation acoustique grâce au moteur de calcul commun de MithraSIG



**Figure 46.** Interface graphique du MithraSound (source : <https://boutique.cstb.fr/acoustique/549-mithrason.html>)

### 3.3.1.3. Ecotect

Ecotect est un logiciel de simulation complet qui associe un modéleur 3D avec des analyses solaire, thermique, acoustique et de coût. Pour l'évaluation sonore d'un espace construit, Ecotect est un outil d'analyse simple et qui donne des résultats très visuels. Ce logiciel offre la possibilité d'étudier la répartition du son, le phénomène de réverbération, de l'écho ainsi que l'effet des matériaux sur la propagation du son. Ecotect a été conçu avec comme principe que la conception environnementale la plus efficace est à valider pendant les étapes conceptuelles du design. Le logiciel répond à ceci en fournissant la rétroaction visuelle et analytique, guidant progressivement le processus de conception en attendant que les informations plus détaillées soient disponibles.

Ecotect est bon pour enseigner au débutant les concepts importants nécessaires pour la conception efficace de l'environnement sonore intérieur ou extérieur.

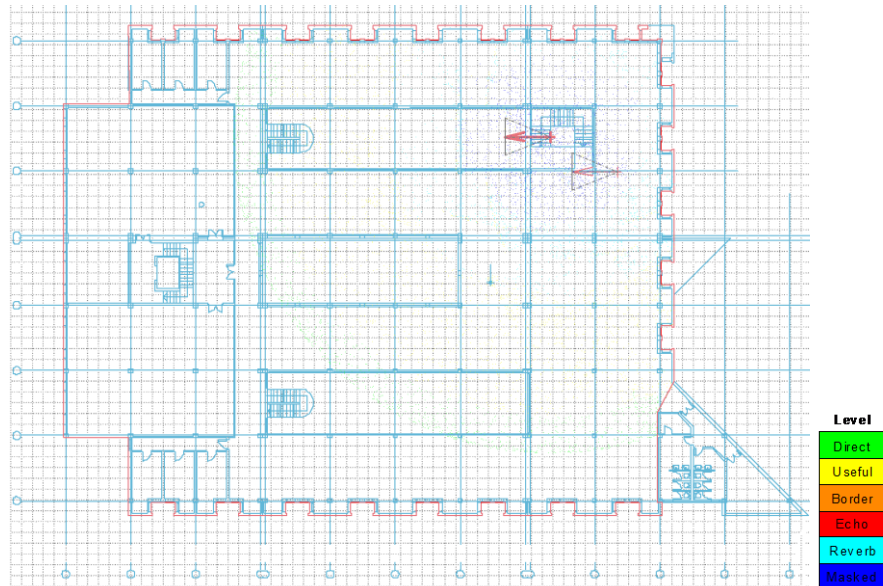


*Figure 47. Output du logiciel Ecotect : Etude du son (source : Auteur)*

#### 3.3.1.4. CadnaR

CadnaR est un puissant logiciel de prédiction acoustique en intérieur. Permettant la réalisation de simulations acoustiques dans les locaux, CadnaR est un outil idéal à la fois pour les problématiques de bruit dans les lieux de travail, et pour l'optimisation acoustique des salles. Principales fonctionnalités sont :

- Modélisation de salles de géométries complexes
- Modélisation des géométries de sources de bruit (points, lignes, zones, parallélépipèdes)
- Définition des niveaux d'émission des machines
- Définition de la directivité des sources ponctuelles aide à la sélection des produits absorbants, appuyée sur une bibliothèque de données de matériaux
- Evaluations spécifiques de l'efficacité des solutions
- Analyse de l'impact de scénarii alternatifs de solutions, notamment par le calcul de la Distribution des niveaux de bruit sur un maillage, en mode 2D ou 3D

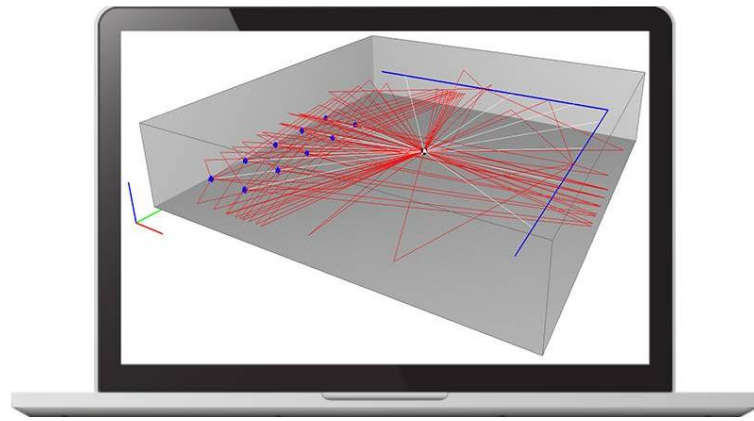


**Figure 48.** Interface graphique du MithraSound (source : <https://www.01db.com/fr/nos-solutions/nos-produits/logiciel-evaluation-acoustique-en-interieur/> )

CadnaR inclut les méthodes de calcul suivantes :

- méthode des images miroir : avec cette méthode, les réflexions qui surviennent sur les surfaces des pièces, sur les obstacles, ainsi que sur les sources réfléchissantes, sont modélisées par des rayons. Chaque trajet de rayon est tracé individuellement en considérant les réflexions sur tout type d'obstacles, jusqu'à l'ordre de réflexion spécifié
- modèle de particules : avec la méthode du modèle de particules, un grand nombre de "particules" est envoyé aléatoirement à partir de chaque source, dans toutes les directions de la salle. Cette méthode prend en compte les propriétés en réflexion des obstacles et des surfaces de la salle, jusqu'à l'ordre de réflexion spécifié
- VDI 3760 : cette méthode, dont le protocole est défini dans la norme allemande VDI 3760, est basée sur la méthode des images miroir. Elle inclut l'application de diffraction et d'amortissement, selon Kuttruff and Jovicic
- champ diffus : cette option permet le calcul du niveau de pression acoustique selon la théorie statistique de la réverbération des salles de Sabine

## RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- ASHRAE. (2017). *Measurement of Energy, Demand, and Power Savings in Buildings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Aubert, C. (2002). *Maisons écologiques d'aujourd'hui*. Terre Vivante.
- Augenbroe, G. (2002). Trends in building simulation. *Building and Environment*, 37(8–9), 891–902.
- Baltus, C., & Guillemeau, J.-M. (2014). *La ventilation mécanique : guide pratique pour les installateurs de techniques spéciales*. Bruxelles : DGTRE et FFC.
- Beausoleil-Morrison, I. (2000). *The Future of TRNSYS and Building Simulation*. National Research Council Canada.
- Bellin, P.-G. (2008). *L'habitat bioéconomique : isolation, chauffage, électricité, eau*. Éditions Eyrolles.
- Blervaque, H. (2014). *Règles de modélisation des systèmes énergétiques dans les bâtiments basse consommation* (Doctoral dissertation, ENMP, Paris).
- Bodart, M., & Deneyer, A. (2008). *Guide précis d'aide à l'interprétation et à l'amélioration des résultats sous les ciels et soleils artificiels du CSTC*. CSTC, p. 30.
- Bontemps, S. (2015). *Validation expérimentale des modèles : application aux bâtiments basse consommation*. Thèse de doctorat.
- Caroline, D. S., & Horsin Molinaro, H. (2017). *Conception acoustique d'une salle : intérêt du prototypage et principe de conception de maquette*. EDUSCOL-STI.
- Clarke, J. A. (2001). *Energy Simulation in Building Design* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Crawley, D. B. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331.
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661–673.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331.
- Daich, S. (2011). *Simulation et optimisation du système light shelf sous des conditions climatiques spécifiques : cas de la ville de Biskra*. Thèse de magistère.
- Daich, S. (2019). *Modélisation du système anidolique pour un environnement lumineux intérieur intégré*. Thèse de doctorat.
- Daich, S., Saadi, M. Y., Zemmouri, N., Eugenio, M., Piga, B. E. A., & Daiche, A. M. (2016). Évaluation quantitative et qualitative du système anidolique sous un climat chaud et aride. *Proceedings of the 3rd International Congress on Ambiances*, Greece, 219–226.
- Deneyer, A. (2003). Comment prédéterminer le confort visuel. *CSTC Magazine*, 8.
- Deroisy, B., & Deneyer, A. (2011). Évaluation de l'éclairage naturel par simulations informatiques. *Les Dossiers du CSTC*, 2011/3.18.
- Fumo, N. (2014). A review on the basics of building energy estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 53–60.
- Gauzin-Müller, D. (2001). *L'architecture écologique*. Paris : Le Moniteur.
- Granderson, J., & Price, P. N. (2014). Development and application of a statistical methodology to evaluate building energy information systems. *Energy and Buildings*, 67, 464–474.

- Habermann, G. (2008). *Architecture et efficacité énergétique*. Éditions Birkhäuser.
- Hand, J. W. (2011). *ESP-r: A Building Energy Simulation Environment*. University of Strathclyde, Glasgow.
- Haubruge, C., & Bodart, M. (2012). *Modélisation et simulation de la lumière naturelle au moyen de DIALux*. Architecture et Climat, LOCI – UCL.
- Hensen, J. L. M., & Lamberts, R. (2011). *Building Performance Simulation for Design and Operation*. Spon Press, London.
- ISO 50015:2014. *Energy Management Systems — Measurement and Verification of Energy Performance of Organizations*.
- ISO 52000-1:2017. *Energy Performance of Buildings — Overarching EPB Assessment — Part 1: General Framework and Procedures*.
- ISO 52016-1:2017. *Energy Performance of Buildings — Energy Needs for Heating and Cooling, Internal Temperatures and Sensible and Latent Heat Loads*.
- Izard, J.-L., & Kaçala, O. *Le diagramme bioclimatique du bâtiment*. Laboratoire ABC, ENSA-Marseille.
- Javier Neila Gonzalez, F. (2014). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Munilla-Lería, p. 233.
- Judkoff, R., & Neymark, J. (1995). *International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), United States.
- Klein, S. A., Beckman, W. A., Mitchell, J. W., Duffie, J. A., Duffie, N. A., Freeman, T. L., & Mitchell, J. C. (2014). *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- Klein, S. A., Beckman, W. A., Mitchell, J. W., Duffie, J. A., Duffie, N. A., Freeman, T. L., Mitchell, J. C., Braun, J. E., & Evans, B. L. (2017). *TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- Kottas, D. (2011). *Matériaux : impact et innovation*. Links.
- Le diagramme de Kruithof. (s.d.). Source : Suzel Balez.
- Li, H., & Yang, L. (2015). A review of building energy monitoring systems. *Energy Procedia*, 78, 3093–3098.
- Ljubica Mudri. (s.d.). *Le diagramme de Kruithof*.
- Loutzenhiser, P. G., Manz, H., Felsmann, C., Strachan, P. A., & Frank, T. (2007). Empirical validation of solar gain models in TRNSYS. *Solar Energy*, 81(6), 711–724.
- Mahdavi, A. (2004). A comprehensive computational environment for performance-based reasoning in building design and evaluation. *Automation in Construction*, 13(1), 53–71.
- Mastrucci, A., & Marique, A. F. (2015). Energy performance monitoring in buildings: Methods and applications. *Energy and Buildings*, 90, 210–220.
- Matthieu, E. (2016). *Confort acoustique des bâtiments*. Cerema CE, DL Autun.
- Miguet, F. (2000). *Paramètres physiques des ambiances architecturales : un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain* (Doctoral dissertation, University of Nantes, France).
- Negrao, C. O. R. (1995). Conception of simulation environments for the design of HVAC systems. *Energy and Buildings*, 22(1), 43–50.
- Peuportier, B., & Blanc Sommereux, I. (1990). Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings. *International Journal of Solar Energy*, 8(2–3), 109–120.
- Pipard, D., & Gualazzi, J.-P. (2002). *La lutte contre le bruit*. Paris : Le Moniteur.

- Roulet, C.-A. (2000). *Thermique du bâtiment : tout le confort avec peu d'énergie*. Lausanne : Édition Nouvelle.
- Roulet, C.-A. (2004). *Santé et qualité environnementale intérieure dans le bâtiment*. PPUR Presses Polytechniques, p. 358.
- SIA 380/1. (2016). *L'énergie thermique dans le bâtiment*. Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes.
- SIA 380/4. (2006). *L'énergie dans le bâtiment — Calcul de l'énergie consommée*. Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes.
- Strachan, P. A., Kokogiannakis, G., & Macdonald, I. (2008). History and development of validation with the ESP-r simulation program. *Building and Environment*, 43(4), 601–609.
- Thellier, F., Bedrune, J. P., & Monchoux, F. (2012). *Le confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant !*
- U.S. Department of Energy (DOE). (2015). *Building Energy Software Tools Directory*.
- U.S. Department of Energy (DOE). (2016). *Building Energy Monitoring and Data Analysis Tools*.
- Viot, H. (2016). *Modélisation et instrumentation d'un bâtiment et de ses systèmes pour optimiser sa gestion énergétique* (Doctoral dissertation, Bordeaux).
- Vu, B., Hernu, P., & Olin, N. (2011). *Construire ou rénover en respectant la Haute Qualité Environnementale : édition revue et mise à jour de la RT 2005 et de la certification Cequami*. Éditions Eyrolles.
- Wetter, M. (2011). Co-simulation of building energy and control systems with the Building Controls Virtual Test Bed. *Journal of Building Performance Simulation*, 4(3), 185–203.
- Yu, X., Su, Y., & Chen, X. (2014). Application of RELUX simulation to investigate energy saving potential from daylighting in a new educational building in the UK. *Energy and Buildings*, 74, 191–202.
- Zhai, Z. J., & Chen, Q. Y. (2005). Performance of coupled building energy and CFD simulations. *Energy and Buildings*, 37(4), 333–344.

## Sites internet

<http://www.izuba.fr>  
<https://energyplus.net>  
(<http://www.trnsys.com>),  
<http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>  
<http://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola>  
<https://energieplus-lesite.be/mesures/eclairage8/simuler-l-eclairage/>  
<https://www.maison-passive-eco.com>  
<http://www-energie2.arch.ucl.ac.be/>  
<http://www.uncubemagazine.com>  
[https://www.canal-u.tv/video/cerimes/acoustique\\_des\\_theatres\\_antiques.9038](https://www.canal-u.tv/video/cerimes/acoustique_des_theatres_antiques.9038)  
[https://www.izuba.fr/logiciels/nova-equer/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.izuba.fr/logiciels/nova-equer/?utm_source=chatgpt.com)  
[https://www.izuba.fr/logiciels/nova-equer/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.izuba.fr/logiciels/nova-equer/?utm_source=chatgpt.com)  
[https://energyplus.net?utm\\_source=chatgpt.com](https://energyplus.net?utm_source=chatgpt.com)  
[https://www.wbdg.org/tools/blast.php?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.wbdg.org/tools/blast.php?utm_source=chatgpt.com)  
[https://www.trnsys.com/tess?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.trnsys.com/tess?utm_source=chatgpt.com)  
[https://www.trnsys.com/tess?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.trnsys.com/tess?utm_source=chatgpt.com)  
[https://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm?utm_source=chatgpt.com)