

« La gestion énergétique naturelle »»



LUMIÈRE NATURELLE • OMBRAGE • VENTILATION • QUALITÉ DE L'AIR • RAFRAÎCHISSEMENT

SOMMAIRE

	Page
Des solutions éprouvées et efficaces pour des constructions exigeantes.	3
1. Construire confortable : quelques notions essentielles.	4
Qu'est-ce que le confort ?	4
Quels sont les objectifs élémentaires du confort visuel et thermique ?	4
Quels rôles jouent les parois ?	4
Le confort : à partir de quelle température et de quel flux de lumière ?	4
Comment maîtriser l'homogénéité de température ?	4
Pourquoi l'humidité relative conditionne-t-elle fortement le confort ?	4
À quoi sert l'indispensable renouvellement d'air ?	4
Qu'est-ce que la température opérative ?	4
2. Les leviers de la gestion naturelle du confort	6
L'œil, témoin fidèle du confort visuel	6
Le corps, en contact direct avec l'air ambiant	6
Le vêtement, naturellement pris en compte dans les calculs	6
La régulation, outil indispensable des systèmes	6
3. Redécouvrir les apports gratuits	8
La lumière	8
Construire bioclimatique !	8
Latérales ou zénithales : quelles solutions pour l'éclairage naturel ?	8
Optimiser le ratio surfaces vitrées sur parois opaques	9
Composer avec trois règles de base	9
Un éventail d'outils pour concevoir	9
Maîtriser les apports lumineux	10
Éclairer naturellement : pour quels bénéfices ?	10
L'air	12
Un besoin permanent de renouvellement d'air	12
Quelles techniques disponibles pour ventiler naturellement ?	13
Des enjeux en phase avec les préoccupations environnementales	14
Une souplesse et des précautions impératives	15
4. Régulation, pilotage, monitoring : un large éventail de solutions pour tirer pleinement parti des équipements.	16
Les solutions possibles	16
La détection de présence	16
Les sondes de température, d'humidité et de CO ₂	16
Les gestionnaires de fonction	16
Pour la ventilation naturelle	16
Pour l'éclairage naturel	16
Pour les façades rideaux	16
Les solutions de gestion technique de bâtiment	16
Solutions en construction neuve ou en rénovation	16
Les applications bâtiment dites « classiques »	16
Comment suivre la performance de ses installations de gestion technique ?	17
Pour en savoir plus.	18
Réglementation	18
Normes	18
Ouvrages	18
Sites Internet	18

Des solutions éprouvées et efficaces pour des constructions exigeantes



Philippe Fritzinger
Directeur général
Adexsi

Alors que persistent les préoccupations énergétiques dans le bâtiment, le discours devient plus global et systémique. La raison en est simple à comprendre : les ouvrages sont conçus et construits pour accueillir des occupants.

Leur confort, leur qualité de vie ou leur productivité tiennent essentiellement aux ambiances créées. Les critères de qualité sont connus : température, lumière, air intérieur. Le défi est d'apporter des solutions naturelles, pérennes, robustes et polyvalentes qui soient aisées à associer et économiques, tant à l'investissement qu'à l'exploitation.

Tandis que s'élabore actuellement la future Réglementation environnementale 2020 (RE 2020), les pouvoirs publics et tous les acteurs de la construction – industriels, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, organisations professionnelles de constructeurs et d'installateurs... – travaillent sur la base du référentiel de préfiguration « Énergie positive et réduction carbone », connu sous l'acronyme « E+C- ».

Cette expérimentation d'initiative volontaire est soutenue par le ministère de la Transition écologique et solidaire et veut favoriser l'efficacité énergétique, réduire les émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie de l'ouvrage (50 ans) et encourager le déploiement des énergies renouvelables.

Les solutions naturelles entrent-elles dans le champ de cette expérimentation ? Oui, car elles répondent aux principes de sobriété énergétique des constructions et d'efficacité des systèmes en raison de leur souplesse et de leur réactivité aux cycles et événements naturels. C'est le cas pour l'apport d'énergie gratuite – par une orientation solaire directe ou une double façade jouant le rôle de « tampon » et assurant un préchauffage de l'air... –, ainsi que pour l'exploitation de solutions de ventilation naturelle, connues depuis l'Antiquité et adaptées aux exigences contemporaines sous les noms de free cooling, night cooling, rafraîchissement adiabatique... Nous verrons dans ce guide toute l'importance d'adapter la régulation et le contrôle-commande à ces équipements.

Quel est l'intérêt de ces alternatives de gestion naturelle de la lumière et de la ventilation face aux solutions hyper-techniques proposées de façon classique aux maîtres d'œuvre ? Elles offrent essentiellement la possibilité de s'approprier intuitivement le fonctionnement des principaux organes techniques d'une construction tout en améliorant le bien-être des occupants. Surtout, elles répondent à la demande fondamentale de la RT 2012 : une conception bioclimatique, la réduction des consommations d'énergie et la maîtrise de la température intérieure estivale de confort.

Désormais, ces solutions présentent des coûts d'investissement, d'installation et d'exploitation généralement bien inférieurs : environnement et économie sont concrètement devenus deux notions complémentaires. Des arguments pour atteindre les objectifs de performance que recherchent les entreprises et leurs gestionnaires.

1. CONSTRUIRE CONFORTABLE : QUELQUES NOTIONS ESSENTIELLES

Qu'est-ce que le confort ?

C'est l'équilibre entre les humains et l'ambiance – visuelle, thermique, aéraulique et acoustique – des espaces occupés. Ce qui demande de maîtriser six facteurs : la lumière (fig. 1.1), la température, l'humidité, le mouvement d'air, le rayonnement et l'activité physique.



Figure 1.1 - La lumière, l'un des facteurs importants du confort.

Quels sont les objectifs élémentaires du confort visuel et thermique ?

L'éclairage a pour objectif d'appréhender l'espace intérieur, ce qui signifie retenir un niveau d'éclairage adapté au besoin des occupants, éviter l'éblouissement et aider à reconnaître fidèlement l'environnement (volumes, formes, teintes...).

L'appropriation de l'espace doit énormément aux diverses propriétés de l'éclairage naturel. En termes de santé, il est reconnu pour son action physiologique positive : régulation des cycles biologiques (veille et sommeil, humeur...), sécurité dans l'exécution des tâches, amélioration de la concentration et des apprentissages et mise en valeur des qualités esthétiques des locaux.

Techniquement, la lumière naturelle permet de bénéficier d'apports extérieurs qui évitent le recours à la lumière artificielle, réduisant d'autant les consommations d'énergie des bâtiments.

La prise en compte environnementale des constructions réalise la synthèse de ces bénéfices.

Quant au confort thermique, il a pour but de maintenir la thermorégulation – la chaleur interne du corps à 36,7°C, la température de surface de la peau de 33 à 34°C – et d'assurer la qualité de l'air intérieur par son renouvellement pour évacuer humidité et polluants (gaz carbonique, odeurs, composés organiques volatiles [COV]...).

Quels rôles jouent les parois ?

Murs, menuiseries extérieures et toiture composent l'enveloppe de protection contre les éléments naturels : chaleur, froid, vent, pluie. Mais cette fonction peut être contrariée par des effets de **paroi froide en hiver, de surchauffe – en toute saison selon l'exposition –, d'accumulation de chaleur avec déphasage nocturne en été, d'humidité...**

Le confort : à partir de quelle température et de quel flux de lumière ?

En hiver, la température de chauffage est fixée à 19°C par les textes réglementaires (articles R. 241-25 à R. 241-29 du Code de l'énergie).

En été, l'inconfort commence à 26°C ressentis durant cinq jours consécutifs. Ce seuil de température intérieure de confort (TIC) figure dans la RT 2012 (articles R. 131-29 et R. 131-30 du Code de la construction et de l'habitation).

Le flux lumineux minimal doit, lui, être de l'ordre de 200 lux. Il est cependant recommandé d'atteindre 300 lux pendant 50 % du temps et sur 90 % des surfaces.

Comment maîtriser l'homogénéité de température ?

Pour répondre aux besoins physiologiques, la stratification horizontale de la température doit être inférieure à 1°C/m, et avoir un maximum de 3°C entre le sol et le plafond (à 2,5 m).

L'effet de paroi froide – ou stratification verticale – est ressenti dès que la différence entre la température de surface des murs et l'air ambiant atteint et dépasse 5°C, et dès que la différence entre la température de surface des parois vitrées et l'air ambiant atteint ou dépasse 10°C. L'inconfort se manifeste physiquement, du frisson à l'éternuement.

Pourquoi l'humidité relative conditionne-t-elle fortement le confort ?

Les ambiances doivent être maintenues dans une plage étroite : 40 à 60 % d'humidité relative, voire de 30 à 70 % HR (fig. 1.2) :

- Un faible taux – moins de 30 % – provoque une sécheresse de l'air, avec une augmentation des poussières, une gêne respiratoire...
- Un fort taux – plus de 70 % – dégrade la qualité des ambiances : croissance microbienne, développement de champignons, apparition d'insectes, interactions chimiques...

À quoi sert l'indispensable renouvellement d'air ?

La ventilation a trois objectifs :

- maintenir le bâti en évacuant l'humidité pour éviter la dégradation des matériaux par condensation et le développement de moisissures ;
- assurer une qualité de l'air intérieur (QAI) suffisante pour la santé des occupants : par la respiration et la transpiration, une personne produit au moins 50 g d'eau par heure... S'y ajoutent les activités quotidiennes : cuisine, hygiène (bains, douches, lessive...);
- améliorer la qualité de l'air intérieur : les espaces intérieurs sont reconnus plus pollués que l'air extérieur car le CO₂ produit par les résidents est la première source de pollution de l'air intérieur...

Pour rester confortable, ce « balayage » aéraulique de l'ambiance doit être de 0,2 m/s. L'inconfort lié à des vitesses supérieures est réel en conditions d'hiver, particulièrement durant les périodes de chauffage avec des températures inférieures à 25 °C.

Ce n'est plus vrai pour des températures plus élevées. Dans ce cas, en facilitant l'évapotranspiration et en éliminant la « mouillure cutanée », des vitesses d'air plus élevées sur la peau améliorent le confort : c'est l'effet dit « brise d'été ».

À titre d'exemple, si la vitesse de l'air est égale à 1 m/s, la température alors ressentie sera égale à la température ambiante diminuée de -4 °C.

Les occupants peuvent cependant accepter des variations en fonction des saisons et de leur adaptation physiologique.

Qu'est-ce que la température opérative ?

Pour estimer la température ambiante, il faut calculer une température dite « résultante sèche » ou « opérative ». Elle tient compte de la température de l'air et de celle de rayonnement de toutes les parois. Sa formule simplifiée est :

température opérative = (température de l'air + température des parois) / 2

$$t_o = \frac{(t_a + t_{mr})}{2}$$

- 1** Polygone de confort hygrothermique
- 2 & 3** Zones de développement de bactéries et de microchampignons
- 3** Zone de développement d'acariens
- 4** Zone à éviter : problèmes de sécheresse, manque d'humidité relative

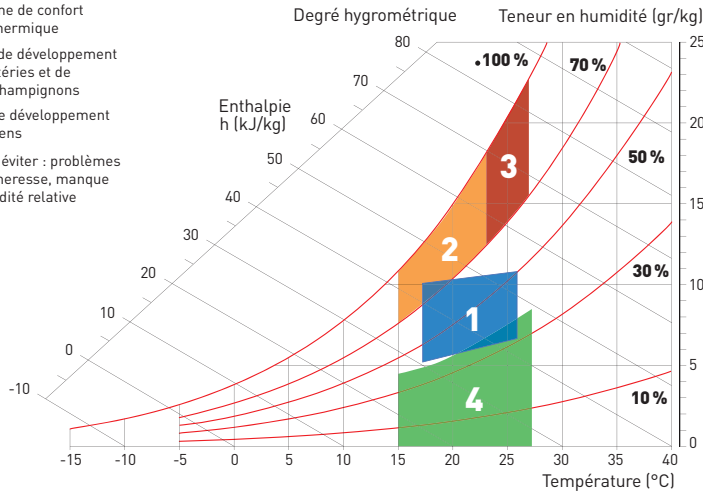


Figure 1.2 - Lien entre température ambiante et degré d'humidité pour repérer la zone de confort.

Les critères du confort intérieur :

- la température des parois
- la température de l'air
- la vitesse de l'air
- l'humidité
- le métabolisme
- l'habillement

Les échanges thermiques :

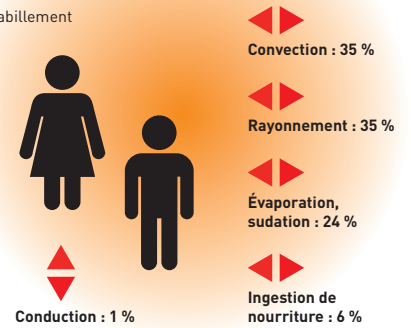
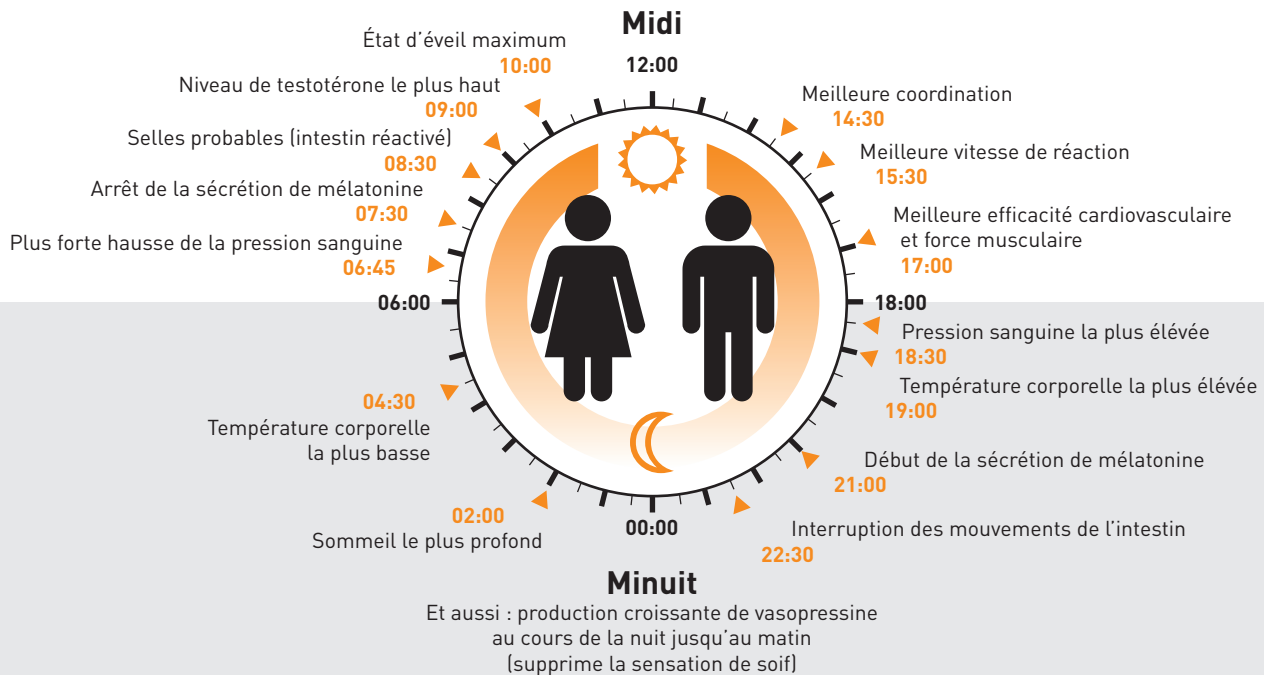


Figure 2.2 - Les occupants et leur environnement intérieur



Le cycle circadien : l'exposition à la lumière naturelle permet de respecter les rythmes biologiques

Mis en évidence à la fin des années 1970, le rythme circadien définit le rythme physiologique et biologique des organismes vivants – végétaux et animaux – sur 24 heures. Il est principalement marqué par l'alternance veille-sommeil, et, en période d'éveil, il distingue des périodes de pics, de niveaux moyens et de creux. Cela a permis de souligner les variations de vigilance.

Les recherches ont mis en évidence l'impact de l'environnement sur ce cycle, notamment les variations lumineuses. La lumière naturelle joue un rôle important de repère, et la lumière artificielle, du fait de la différence de longueurs d'onde émises par rapport à la sensibilité de l'œil humain, est maintenant reconnue comme perturbatrice. Ainsi, la teinte bleue des LED perturberait la production de mélatonine – dite hormone du sommeil – et influerait sur l'endormissement naturel.

Cette théorie a permis d'avancer sur des études plus approfondies sur les décalages horaires et les effets profonds sur la santé : ils s'étendent du stress à la dépression saisonnière et pourraient expliquer une prédisposition aux maladies cardiovasculaires.

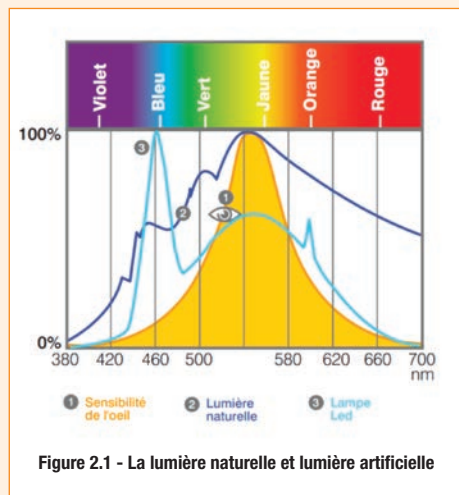
2. LES LEVIERS DE LA GESTION NATURELLE DU CONFORT

L'œil, témoin fidèle du confort visuel

Nos yeux perçoivent les teintes allant du violet au rouge, c'est-à-dire celles ayant de valeurs de longueur d'onde de 400 à 700 nm. Le « pic » de vision se situe, lui, dans le vert-jaune, aux alentours de 550 nm.

La lumière naturelle suit une courbe de distribution des teintes émises très proche de celle de l'œil, avec un pic de lumière qui croise celui de la sensibilité maximale de l'œil soit une adaptation totale (fig. 2.1).

En revanche, les lumières émises par les sources artificielles divergent totalement : les anciennes lampes à incandescence émettaient des longueurs d'onde fortement dans les orangés et les rouges, et les actuelles lampes LED dites froides (« cool white ») émettent, elles, dans les bleus (± 450 nm). La réduction de l'exposition à ces sources limite les effets sur le comportement : fatigue oculaire, états mélancoliques...



Le corps, en contact direct avec l'air ambiant

Plus de la moitié des pertes de chaleur du corps humain sont le fait de la convection avec l'air ambiant. Pour près de 35 %, ce transfert s'effectue par rayonnement de la surface de peau, évaporation et sudation (fig. 2.2)...

Lors d'un travail dit léger, la température maximale de confort est centrée sur 20-22°C à ± 3 °C ; assis et sans activité, la température maximale de confort est de 26°C à ± 1 °C ; pour le sommeil, cette température de confort est de 18°C à ± 3 °C...

Pour maîtriser le sujet du « métabolisme thermique » (Mth), les thermiciens se réfèrent à diverses situations. Ainsi, le niveau standard est fixé sur la position assise, au repos : la « puissance thermique » du corps est évalué à 58,2 W/m² de peau, soit 1 met, unité spécifique relative au métabolisme.



À noter : un individu de 1,70 m et de 70 kg présente une surface de peau d'environ 1,8 m² (soit environ 100 W) pour 1 met.

Au repos et couché, le corps émet environ 45 W/m² ; assis et en activité légère, on atteint 70 W/m² ; debout et en activité légère, cette puissance thermique croît à 95 W/m² ; debout et en activité plus intense, par exemple sur une machine, l'émission du corps est de 115 W/m² ; debout et en activité soutenue, cette puissance est estimée à 175 W/m², soit 3 met. Autre exemple ? En night-club, la puissance thermique d'une personne s'exprimant par une danse dite « modérée » serait de 250 à 265 W/m²...

Le vêtement, naturellement pris en compte dans les calculs

Dans des locaux résidentiels ou de travail, les occupants s'accommodent des ambiances en adaptant leurs vêtements aux activités. Faut-il le rappeler : se vêtir crée une résistance thermique entre la peau et l'environnement.

Les thermiciens ont étalonné les niveaux d'habillement selon l'unité « clo » (1 clo est égal à une résistance thermique surfacique de 0,155 m².°C/W) (tableau 2.1).

- 1 clo correspond à la tenue intérieure d'hiver, avec pantalon, chemise et pull ;
- 1,5 clo est attribué à une tenue de ville traditionnelle complète ;
- inversement, 0,7 clo caractérise la tenue de travail légère ; 0,5 clo, la tenue d'été ; 0,3 clo, une tenue estivale de détente – short et chemisette... – ; 0,1 clo, le port d'un short ; et 0 clo, pour un corps nu.

La régulation, outil indispensable des systèmes

Le confort se situe au carrefour de trois problématiques : le corps et sa physiologie, les comportements (activités, habillement...) et les techniques mises en œuvre (chauffage, ventilation, éclairage...).

La satisfaction des occupants d'un bâtiment suppose « de leur donner la main » sur les différents systèmes : chauffage, ventilation, éclairage, aération par les fenêtres...

Les expérimentations soulignent une appréciation très différente d'un occupant à l'autre, une notion très clairement exprimée dans la norme internationale EN ISO 7730 sur l'évaluation du ressenti thermique.

Cette norme propose deux indices de satisfaction :

- le PMV, pour « Predicted Mean Vote » ou avis moyen d'un groupe sur une situation de confort ;
- le PPD, pour « Predicted Percentage Dissatisfied » ou pourcentage prévisible d'occupants insatisfaits.

La pratique indique qu'avec un PMV égal à zéro, il reste 4 % d'insatisfaits (PPD)...

Les outils de régulation – robinets de radiateurs, gestion décentralisée reliée aux sondes de mesures... – doivent être réactifs, voire capables d'anticiper les événements météorologiques : évolution à 24 ou 48 heures (pour préchauffer les bâtiments en hiver, « surventiler » en été...), ensoleillement des façades pour animer les protections solaires, variation rapide de température, d'hygrométrie, de luminosité et du vent en cas d'orage...

Pour être efficaces, ces équipements doivent être compris des occupants pour qu'ils se les approprient.

Tableau 2.1 : Métabolisme énergétique pour différents types d'activité (extrait d'après la norme ISO 7730 : 2005)

Activité	Métabolisme énergétique	
	W/m ²	met
Repos, couché	46	0,8
Repos, assis	58	1,0
Activité sédentaire (bureau, domicile, école, laboratoire)	70	1,2
Activité légère, debout (achat, laboratoire, industrie légère)	93	1,6
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager, travail sur machine)	116	2,0
Marche à pied :		
- 2 km/h	110	1,9
- 3 km/h	140	2,4
- 4 km/h	165	2,8
- 5 km/h	200	3,4

Des informations complémentaires concernant le métabolisme énergétique sont données dans la norme NF EN ISO 8996. Il est à noter que les personnes âgées peuvent avoir une activité moyenne plus faible que les personnes plus jeunes.

Témoignage

Faire participer les usagers à la construction

« La lumière et la ventilation naturelles participent au confort de vie en tertiaire comme en résidentiel. La lumière naturelle est recherchée et réputée agréable, énergisante... Le vocabulaire qui lui est associé est positif. Les difficultés apparaissent avec les apports solaires en été, aux effets de surchauffe, surtout dans les locaux bien isolés. Les protections solaires, la manipulation des ouvrants sont indispensables, mais pas toujours possibles.

Dans les régions du sud de la France, ces comportements de protection diurne et d'aération nocturne sont culturellement acquis ; dans celles du nord, c'est différent. Indépendamment, il peut exister des contraintes de bruit ou de sécurité qui ne permettent pas d'ouvrir les fenêtres, notamment pour la ventilation nocturne.

Très clairement, la ventilation, au sens de l'aération, a toujours été pratiquée dans les bâtiments. Les difficultés tiennent à la prise de conscience technique des circuits de ventilation. Concrètement, ces dernières années, on est certainement allé trop loin en matière de technicité de la ventilation, cette fonction ayant été très fortement mise en lien avec l'optimisation énergétique des bâtiments. Ce "rêve d'ingénieur" a provoqué des soucis en termes d'usage : fermeture de bouches d'aération, défauts de maintenance des filtres...

Il est sans doute préférable de retenir des solutions plus simples de ventilation naturelle qui tiennent compte de l'action de l'utilisateur pour renouveler l'air ou rafraîchir son environnement intérieur.

À ce titre, une autre question importante se pose vis-à-vis de ces fonctions d'éclairage et de ventilation dans les bâtiments : ce sont les automatismes. Tout automatiser – selon la présence ou la pollution intérieure – peut sembler faciliter la vie. En réalité, cela n'a parfois pas de sens ! Il faut laisser la main aux occupants... ne serait-ce que pour éviter qu'ils se battent avec ces outils très techniques. Inversement, on ne peut pas laisser les usagers être "à plein temps" sur le pilotage des bâtiments : ils ont autre chose à faire !

Ces hiatus tiennent essentiellement à la promotion des technologies ou à la réglementation. On devrait plutôt être à l'écoute des résidents ou des occupants. Une telle démarche a été initiée avec les "livrets d'accueil", mais ils ne suffisent pas pour accompagner. Désormais, bailleurs sociaux, promoteurs de locaux tertiaires ou résidentiels, syndicats de copropriétés et architectes vont plus loin et optent pour une "construction participative" : on écoute les besoins des usagers, puis les concepteurs cheminent avec eux. En clair, au lieu d'expliquer le fonctionnement des équipements en aval des projets, les professionnels retiennent les choix techniques en amont en se basant sur les besoins, l'objectif étant que les occupants s'approprient les moyens mis à leur disposition. C'est une démarche intelligente, mais qui de toute manière prendra une génération à se déployer. »

Gaëtan Briseperrière,
sociologue spécialiste de la transition énergétique,
l'habitat et l'environnement

Des labels environnementaux très exigeants

La plupart des labels environnementaux pour les bâtiments très performants mettent en avant le recours à la lumière naturelle par l'utilisation d'indicateurs spécifiques.

Ainsi :

- Le label **BREEAM** fixe à l'indicateur « Hea 01 Visual comfort » un objectif de facteur de lumière du jour. Deux critères sont demandés : un éclairement moyen en lumière du jour et un éclairement minimal en un point en lumière du jour. On retient généralement le FLJ de 1,8 % sur 80 % de la surface, l'autonomie d'éclairage naturel annuel de 2 650 heures à 200 lux, une uniformité d'éclairage au regard de la profondeur de la pièce... Par ailleurs, ce label propose trois types d'autonomie lumineuse : « Éclairage naturel », « Éclairage naturel exempte » et « Éclairage naturel international ».
 - Le label **LEED** pose l'indicateur « IEQ credit 8.1 » relatif à la simulation du calcul de l'éclairage. Il demande de respecter des niveaux d'éclairage de 270 lux à 5 400 lux, à 9h et 15h, par un jour de ciel clair à l'équinoxe. L'atteinte de cette condition pour 75 % de la surface occupée confère 1 point, 2 points pour 90 %.
 - Le référentiel du label **HQE** publié en 2016 fixe deux objectifs : le premier est le facteur de lumière du jour (un FLJ entre 0,7 et 2 % sur 80 à 90 % des surfaces, et selon le niveau de performance environnementale recherché) ; le second est l'autonomie en lumière du jour : la part quotidienne d'éclairage en lumière du jour sur 80 % d'une surface de référence doit être au moins égale au niveau préconisé pour l'activité pratiquée selon la norme EN 12464-1.
 - Le **WELL Building Standard** définit sept facteurs de bien-être des salariés, dont la lumière. Son référentiel vise à réduire les perturbations du rythme circadien de l'organisme. Les exigences portent sur la très large connaissance acquise au cours des dernières années sur les impacts de la lumière sur l'organisme : conception de l'éclairage, performance des vitrages, prise en compte des teintes intérieures, distribution et contrôle de l'éclairage artificiel et naturel pour améliorer l'humeur et la productivité des occupants...
 - Les labels de l'association **Effinergie** (BBC, Bepos, et Bepos+) reposent sur la réglementation RT 2012 et sont renforcés par des règles du référentiel E+C- qui préfigure la future réglementation environnementale, RE 2020. Cette dernière constituera la transposition en droit national de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (directive 2018/844 du 30 mai 2018). Si ces textes font la part belle à la ventilation mécanique, ils ont pour intérêt de mentionner les exigences renforcées ayant un impact direct sur la ventilation et les consommations d'éclairage :
 - en maison individuelle, un Bbio max réduit de 20 % (coef. 0,8) et un Cep max - 20 % ;
 - en logement collectif, une modulation du Bbio max d'un coefficient 0,6 à 0,8 selon la compacité de l'ouvrage, et un Cep max - 20 % ;
 - en tertiaire, un Bbio max - 20 % et un Cep max - 40 %.En résidentiel, le contrôle de la ventilation s'effectue selon les règles Promovent et s'accompagne de vérifications fonctionnelles.
- En tertiaire, on retient un contrôle visuel, des vérifications fonctionnelles et une mesure de l'étanchéité à l'air des réseaux.

3. REDÉCOUVRIR LES APPORTS GRATUITS

Avec la remise en chantier régulière des réglementations thermiques, les apports gratuits aux bâtiments ont repris leurs marques aux côtés des systèmes d'enveloppe et d'équipement.

Que recouvrent les termes d'apports gratuits ? Il s'agit des charges externes et internes des constructions. Déjà prises en compte dans les calculs, leurs impacts se sont en revanche considérablement amplifiés avec le renforcement de règles d'isolation et d'étanchéité des parois.

Deux mesures de la RT 2012 imposent d'en préciser le calcul.

La première : l'obligation, pour un accès à l'éclairage naturel, de recourir à une surface minimale de baie vitrée, soit 1 m² pour 6 m² de surface habitable ; la seconde : la limitation de la consommation d'énergie des cinq principaux usages – dont l'éclairage et la ventilation – à 50 kWh/m²/an. Applicable depuis maintenant cinq ans, cette réglementation a largement ouvert la voie au bioclimatisme.

De fait, les concepteurs prennent en considération des éléments typiques des constructions traditionnelles, vernaculaires : orientation, forme, impact des constructions voisines, conditions extérieures (climat, végétation et relief), caractéristiques des matériaux utilisés, dimensions et emplacement des menuiseries, types d'occupation (nombre de personnes, activités, durée quotidienne)...

Le bilan thermique peut ainsi être affiné de l'ensemble des charges externes : apport de chaleur par rayonnement solaire par les murs, la toiture ou le plafond, et le plancher ; par rayonnement solaire sur les vitrages ; par le renouvellement d'air et les infiltrations...

Les outils de calcul prennent aussi en compte les charges internes que sont les apports de chaleur par les occupants et par l'éclairage artificiel.

LA LUMIÈRE

Construire bioclimatique !

« L'architecture bioclimatique est celle qui optimise le fonctionnement du bâtiment sur les ressources (ou les nuisances) offertes par son environnement extérieur (température, soleil, lumière, air...) » : cet extrait du guide Bio-tech « Confort d'été passif », réalisé par l'Arene Île-de-France et l'ICEB, pose les bases de la réflexion. Les concepteurs chercheront donc à tirer utilement profit des sources naturelles d'énergie – lumière, chaleur, vent – pour les exploiter en chauffage, rafraîchissement, ventilation et éclairage naturels.

L'application de la RT 2012 demande de prendre en compte les données climatiques, les caractéristiques du bâti et les scénarii d'utilisation pour calculer le coefficient du bâtiment bioclimatique, dit Bbio, véritable indicateur de la qualité de la conception et de l'implantation du projet au regard de ses besoins énergétiques.

Sa formule additionne les besoins de chauffage (d'un coefficient 2), les besoins de rafraîchissement ($\times 2$) et les besoins en éclairage ($\times 5$). Le résultat, sans unité, doit être inférieur au Bbio de référence dans la zone géographique du bâtiment.

Latérales ou zénithales : quelles solutions pour l'éclairage naturel ?

L'industrie fournit une très large gamme de solutions pour l'apport de lumière dans les locaux tertiaires, industriels ou logistiques :

- **Les baies et les façades.** Les baies vitrées – fenêtres ou portes-fenêtres – seront choisies avec un clair de vitrage maximal pour éviter de faire obstacle au passage de la lumière. Les concepteurs puiseront parmi les types de vitrages disponibles : clairs, teintés, réfléchissants ; simples, doubles ou triples selon les prescriptions thermiques et la gestion des apports directs de chaleur.



Figure 3.3 - Les verrières permettent de réaliser des volumes tampons profitables en termes thermiques.

Quelle est leur épaisseur et quelle sera la mise en œuvre des menuiseries : en tableau ou en applique ? Avec quelle forme d'embrasure (droite, ouverte) ? Avec quelle hauteur de linteau ?... Il va de soi que le choix des baies s'étudie aussi en tenant compte des parois opaques – des murs – dans lesquels elles sont installées.

Les multiples façades légères disponibles sur la marché sont généralement proposées avec des arguments techniques chiffrés au regard du potentiel d'éclairage naturel.

- **Les solutions zénithales.** Elles existent depuis très longtemps sous de multiples formes. Les plus simples et communes sont les fenêtres de toit. Posées sur les rampants, elles conviennent particulièrement à l'éclairage des pièces en combles. Les architectes et bureaux d'études utilisent aussi couramment les puits de lumière. Les formules techniques disponibles – à réflecteur ou diffuseurs – permettent de redistribuer une lumière naturelle aux longueurs d'onde adaptées à la vue et profitable en termes de confort global.

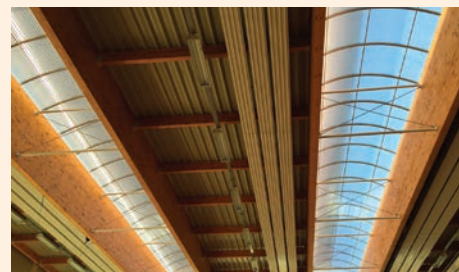


Figure 3.1a - Les voûtes et lanterneaux filants conviennent aux grands volumes : centres commerciaux, sites de stockage...

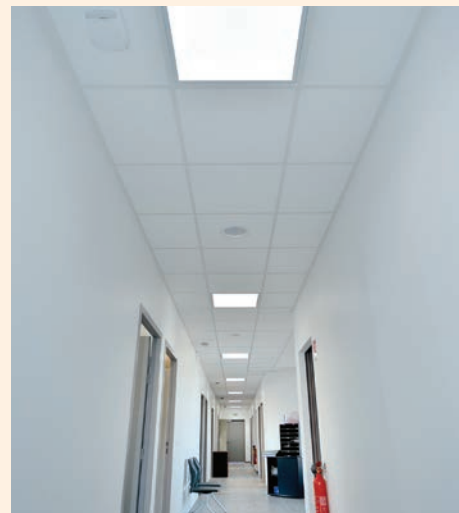


Figure 3.1b - Les modèles de conduits de lumière sont nombreux et adaptés à diverses situations.

Dans les locaux tertiaires, logistiques, commerciaux ou industriels, les lanterneaux simples ou filants sur toit plat (Fig. 3.1a et Fig. 3.2) constituent des solutions techniquement simples et esthétiques. Les solutions proposées par les fournisseurs intègrent désormais les problématiques d'éblouissement et d'isolation thermique. De même, à la faveur de grands chantiers de rénovation – tel l'Hôtel-Dieu à Lyon –, les verrières (Fig. 3.3) connaissent un renouveau pour leur qualité d'éclairage et de protection contre les éléments. Souvenons-nous qu'elles sont à l'origine du commerce moderne au milieu du XIX^e siècle, avec leur utilisation dans les passages couverts parisiens...



Figure 3.2 - Les lanterneaux sont un classique des équipements de toitures industrielles et tertiaires.

Quant aux sheds, équipements caractéristiques des bâtiments industriels, ils possèdent pour intérêt primordial de pouvoir être orientés au nord – afin de maîtriser totalement l'éblouissement – et de recevoir tout type de remplissage.

Optimiser le ratio surfaces vitrées / parois opaques

Si la réglementation thermique demande un ratio minimal de 1 m² de paroi vitrée pour 6 m² habitable, l'objectif d'exploiter au maximum ces apports lumineux laisse la porte ouverte à plus de créativité pour proposer un confort optimal.

Une formule simple permet aux concepteurs d'élaborer une approche satisfaisante : le facteur de lumière du jour, ou FLJ.

Déterminé pour un point intérieur précis – sur le plan de travail d'un bureau, au sol... –, c'est le rapport entre l'éclairement naturel reçu sur l'éclairement extérieur par ciel couvert :

$$FLJ = \frac{E_{\text{intérieur}}}{E_{\text{extérieur}}} \times 100\%$$

Composer avec trois règles de base

Qualité de transmission lumineuse, uniformité d'éclairage, autonomie d'éclairage naturels... ces demandes peuvent être satisfaites en respectant une approche simple et rigoureuse :

1. Atteindre le seuil minimal de 300 lux durant 50 % de l'occupation et sur 90 % de la surface. Préconisé depuis de nombreuses années au niveau international, ce niveau d'autonomie de lumière naturelle est clairement indiqué dans la nouvelle norme EN 17 037 relative à « l'éclairage naturel des bâtiments ».

Pour gérer la variation lumineuse selon la localisation, il est possible d'exploiter des bases de données géographiques, par exemple les informations diffusées par le site www.satell-light.com. Retenons cependant que la lumière disponible à l'extérieur varie selon la situation géographique. On prendra en compte le niveau de lumière requis suivant l'activité du bâtiment et sa localisation pour déterminer la surface d'éclairage nécessaire ainsi que le type de remplissage (verre, ombrage, polycarbonate...).

2. Uniformiser l'éclairage naturel grâce aux matériaux. Diffusants ou transparents, ils aident à homogénéiser la répartition de lumière dans les bâtiments et règlent les situations d'inconfort classiques : éblouissement, ombres... Des protections solaires peuvent y être associées.

3. Calculer la surface géométrique de lumière, ou SGL, car ce ratio est basé sur le facteur de lumière du jour rapporté au facteur de transmission lumineuse du remplissage (du verre transparent au matériau opalescent), dite « TV ». Il permet de déterminer la surface d'ouverture, essentiellement en toiture. Sa formule est :

$$SGL = \frac{2,3 FLJ}{TV}$$

Un éventail d'outils pour concevoir

Les outils d'aide pour les maîtres d'œuvre permettent d'optimiser, analyser et simuler l'orientation du bâtiment à construire ou à équiper. Les concepteurs ont à leur disposition des outils de localisation géographique, d'historiques d'événements météo... Il leur est alors possible de prédimensionner les projets. Le récent « Guide de l'éclairage naturel zénithal », réalisé par les industriels réunis au sein du groupement GIF Lumière (cf. « Pour en savoir plus »), présente une approche avec quelques outils (formules de calcul, tableaux, exemples...) qui permettent de cerner les options réalistes.

Témoignage

Fournir un grand confort de travail

« Lorsque nous travaillons sur des ouvrages neufs ou à rénover tels que des gymnases, des ateliers d'usine ou des entrepôts, nous considérons qu'il est important de sensibiliser le maître d'ouvrage à l'exploitation du gisement de lumière naturelle. Pour tous ceux qui y travaillent, il en va de leur confort visuel. Avec l'expérience, nous savons que cela va même au-delà : c'est une manière de redonner aux occupants du bien-être, de l'énergie, et de prendre en compte certaines formes de fatigue au travail.

En construction neuve sous RT 2012, pour réduire le coefficient bioclimatique Bbio, l'éclairage naturel présente des avantages importants : il faut garder à l'esprit que, dans la formule de calcul, les consommations d'énergie par l'éclairage artificiel sont affectées d'un coefficient 5 ! L'augmentation des surfaces d'ouverture, en façade ou en toiture, améliore globalement le résultat.

Nous avons mis ce type d'éclairage en pratique, chez un industriel français, dans un atelier de soudage manuel de composants électroniques, ce qui demande beaucoup de précision. L'éclairage naturel a fait l'objet d'une indispensable étude pour éviter l'éblouissement. Il fournit réellement un grand confort de travail aux opérateurs.

Nos garde-fous vis-à-vis de ces solutions sont, en premier lieu, d'éviter à tout prix l'éblouissement en travaillant la simulation – nous collaborons avec des éclairagistes, et il existe aussi des outils gratuits de visualisation –, et, en second lieu, de traiter les risques thermiques, de surchauffe ou de déperdition.

Parmi l'ensemble des solutions disponibles, nous apprécions particulièrement les tunnels verticaux à concentration de lumière. Ces équipements présentent à la fois un intérêt en termes d'éclairement et d'isolation thermique du bâtiment : ils ne diffusent jamais de lumière directe car la concentration est associée à une diffusion et la colonne d'air entre l'émergence extérieure du spot et le débouché intérieur garantit une faible transmission thermique. Cette caractéristique vaut pour le confort d'hiver, mais aussi pour le confort d'été, car ces conduits de lumière évitent la surchauffe. »

Joséphine Ledoux,
ingénieure, co-gérante du
bureau d'études Enea Conseil

Les bureaux d'études disposent de nombreux logiciels pour tenir compte de la forme et de la hauteur des bâtiments à traiter.

On peut citer :

- Heliodon, qui effectue un diagramme solaire et le calcul d'éclairement direct du soleil selon le lieu, la date et l'heure ;
- DL-Light et DL-Instant, des extensions de l'outil Sketchup pour évaluer la lumière naturelle dans les ouvrages et les ensembles urbains ;
- Relux, Dial + Radiance ou Archiwizard pour une approche approfondie des projets.

À ce titre, le GIF Lumière rappelle quelques règles d'ajustement des outils de visualisation pour réduire l'écart entre la simulation et la réalité après chantier : renseigner les bases de données des facteurs de réflexion des parois ; indiquer précisément les propriétés translucides ou diffusantes des ouvertures et réaliser la simulation sur un bâtiment vide, c'est-à-dire non meublé.

Des outils de simulation thermique dynamique (STD), tels Pleiades-Comfie, Designbuilder, Virtual Environment..., ou de mise en évidence des ombres sur un cycle annuel à l'aide d'applications 3D BIM conviennent aussi pour ce besoin...



À retenir : la donnée exploitable la plus importante est le facteur de lumière de jour (FLJ) moyen sur une surface de référence.

Maîtriser les apports lumineux

La performance de la lumière naturelle dans les locaux de travail ou résidentiels tient à la maîtrise des variations qui peuvent perturber le confort des occupants, essentiellement l'éblouissement et les surchauffes.

La démarche fondamentale des concepteurs repose sur l'orientation des constructions et la simulation des choix techniques : dimension et adaptation des ouvertures, choix des remplissages verriers pour optimiser la transmission lumineuse, facteur solaire (vitrages clairs, à contrôle solaire, réfléchissants).

Les maîtres d'œuvre doivent compléter l'ouvrage de dispositifs de protection. Il faut distinguer pour ceux-ci plusieurs niveaux de solution :

- l'intégration environnementale : la végétation ou le relief servent utilement à protéger ou éclairer les façades selon les saisons ;
- l'animation architecturale de la façade à l'aide de casquettes, de brise-soleil horizontaux ou verticaux fixes, d'une résille extérieure, voire de toitures et façades végétalisées ; les bâtiments plus épais peuvent bénéficier de patios, puits de lumière ou

atriums... Ces solutions permettent d'exprimer un parti environnemental fort et de rompre la monotonie des façades produite par une stricte lecture de la réglementation thermique ;

- l'équipement des menuiseries à l'aide de stores à lames orientables, de stores intérieurs ou extérieurs (parfois réfléchissants), à projection, stores bannes, voire vénitiens et intérieurs aux remplissages à double vitrage ; des vitrages électrochromes, assurant un assombrissement par activation électronique, commencent aussi à se développer. En toiture, les sheds, lanterneaux ponctuels et filants, fenêtres de toit peuvent être équipés de remplissages diffusants, de stores en toile, verticaux ou horizontaux...

Éclairer naturellement : pour quels bénéfices ?

La prise en compte de l'éclairage naturel présente un impact à la fois humain, technique et financier :

- En choisissant d'éclairer les locaux avec une ressource solaire optimisée et maîtrisée, les maîtres d'ouvrage privilégient le respect des besoins physiologiques élémentaires des occupants. La longueur d'onde de la lumière naturelle centrée sur 550 nm respecte la vision ; les sources d'éclairage artificielles – LED ou fluorescentes – sont généralement décalées dans le spectre visible, notamment vers le bleu ; ces éclairages sont aujourd'hui reconnus pour perturber le cycle veille-sommeil.

Enfin, généralement associé avec une vision du panorama extérieur, l'éclairage naturel participe au bien-être des occupants par la combinaison d'effets visuels, biologiques et émotionnels. Les observations rapportent une diminution de l'absentéisme, une amélioration de la concentration...

- L'exploitation des apports lumineux et thermiques impacte les postes techniques du chauffage et de l'éclairage.



Figure 3.4 - Apports lumineux par puits de lumière sur le toit.

Dans un bâtiment tertiaire, les besoins d'éclairage s'établissent de 7 à 40 W/m², voire de 7 à 10 W/m². La prise en compte de la lumière naturelle réduit les besoins d'alimentation électrique et limite d'autant les apports de chaleur internes. Il faut aussi retenir que l'arrêté du 22 mars 2017 sur la réglementation thermique des bâtiments existants demande, pour les nouvelles installations d'éclairage dans les ouvrages non résidentiels :

- une gradation de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel ;
- une puissance maximale de 1,6 W/m² d'éclairage artificiel et un éclairement moyen de 100 lux.

Une opportunité de complément des besoins par les apports naturels...

- Enfin, l'impact financier de l'éclairage naturel peut s'analyser sous différents angles : une augmentation de la productivité, une diminution des accidents de travail, une amélioration de la qualité de production, une réduction des consommations d'énergie pour l'éclairage et pour le chauffage.

Par ailleurs, le respect des 300 lux de lumière naturelle durant 50 % de l'occupation permet, dès la conception, de réduire le coefficient de consommation d'énergie primaire (Cep) de 10 à 20 %. Et si l'agrandissement des surfaces de baies se traduit réglementairement par une augmentation des déperditions, concrètement, éclairage naturel et apports thermiques gratuits réduisent les besoins énergétiques de 20 à 60 %...

L'éclairage, 1^{er} poste énergétique d'un immeuble de bureaux RT 2012

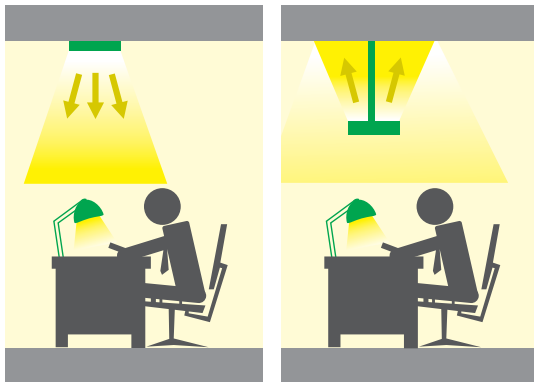
Dans le manuel « Conception des bureaux bioclimatiques », Cegibat cite les chiffres fournis par le bureau d'études Effilios sur la consommation énergétique des immeubles existants, neufs et réalisés sous la RT 2012.

Dans les immeubles anciens, l'éclairage compte pour 18 % des consommations ; dans un immeuble neuf, au regard de la réduction des consommations des équipements techniques (chauffage, rafraîchissement...) et du maintien de celles de la bureautique, la part de l'éclairage diminue de moitié.

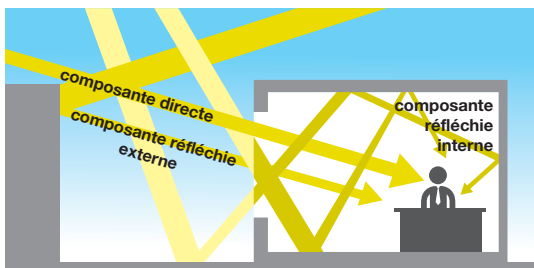
Pour autant, dans un immeuble RT 2012, ce poste de consommation pèse pour 38 % des consommations, contre 14 % pour le chauffage, 21 % pour le rafraîchissement et 27 % pour les auxiliaires. Un niveau lié, selon Cegibat, à « la durée de fonctionnement, élément difficilement maîtrisable et estimable, dès lors qu'il est fonction du comportement des occupants ».

Le vocabulaire pour appréhender la lumière et les grandeurs photométriques

1. **Le flux lumineux** : puissance lumineuse émise par une source. L'unité est le lumen (lm). Un **lumen** est le flux d'un rayon de 555 nanomètres (nm) correspondant à une énergie de 1/683 W.
2. **L'intensité lumineuse** : flux lumineux d'une source dans une direction donnée. L'unité est le **candela** (cd).
3. **L'éclairement lumineux** : flux lumineux reçu par une surface. L'unité est le **lux** (lx). Un lux correspond à 1 lumen sur 1 m².
4. **La luminance lumineuse** : intensité lumineuse d'une source dans une direction donnée. L'unité est le **candela par mètre carré** (cd/m²).
5. **La réflexion** : changement de direction de la lumière venant frapper une surface.
On distingue :
 - la **réflexion spéculaire**, où le rayonnement est réfléchi sur une surface selon un angle identique au rayon incident ;
 - la **réflexion diffuse** où, sur une surface irrégulière, les rayons réfléchis ne sont pas parallèles au rayon incident.
 Le **facteur ou coefficient de réflexion lumineuse** d'une surface exprime le ratio d'énergie lumineuse réfléchie par rapport à celle reçue. L'unité est ρ (rho).
6. **La transmission lumineuse** : flux lumineux qui traverse un matériau. On distingue la transmission lumineuse directionnelle, d'un angle égal à celui du rayon incident, de la transmission diffuse (ou spéculaire). Le **coefficient de transmission lumineuse** (TL) est le ratio du flux lumineux transmis sur le flux incident. Son unité est τ (tau).



Lumière artificielle : exploiter la lumière directe et incidente.



Lumière naturelle : maîtriser le confort en supprimant l'éblouissement et les ombres fortes.

Éclairer les locaux : les prescriptions réglementaires et normatives

■ L'éclairage des zones de travail est précisé par la **circulaire ministérielle du 11 avril 1984** qui précise les décrets n° 83-721 et 83-722 du 2 août 1983.

Cette circulaire demande un **éclairage minimal par type d'activité** :

- **200 lux** pour la mécanique moyenne, la dactylographie, les travaux de bureau ;
- **300 lux** pour le travail de petites pièces, les bureaux de dessin, la mécanographie ;
- **400 lux** pour la mécanique fine, la gravure, la comparaison de couleurs, les dessins difficiles, l'industrie du vêtement ;
- **600 lux** pour la mécanique de précision, l'électronique fine, les contrôles divers ;
- **800 lux** pour les tâches très difficiles dans l'industrie ou les laboratoires.

■ Plus récente, la norme **EN 12464-1 sur la lumière et l'éclairage des lieux de travail**, sortie en 2006 et reformulée en 2011, permet de définir différemment l'éclairement et sa répartition sur la zone de travail. Elle s'applique aux bureaux, ateliers, écoles, hôpitaux et commerces.

1. Elle définit **trois zones d'éclairage** :

- la **zone de travail** : le plan de bureau, le sol... la surface où s'exécute la tâche visuelle ;
- la **zone environnante immédiate**, soit une bande de 50 cm autour de la zone de travail ; la lumière y sera diminuée d'un facteur de 1,5 à 1,66 ;
- la **zone de fond**, soit une bande de 3 m autour de la zone environnante immédiate... dans les limites de l'espace (murs, séparations, mobilier...) ; l'éclairement pourra être du tiers de celui de la zone précédente.

2. Elle prescrit des **niveaux d'éclairage moyens selon l'activité** :

- **200 lux** dans les locaux d'archivage ;
- **300 lux** pour les locaux commerciaux, entrepôts, locaux sportifs, locaux de réception, bureaux (guichets, classement...) ;
- **500 lux** dans les ateliers d'assemblage de précision ou d'usinage, dans les bibliothèques ou salles de lecture, dans les cuisines, dans les locaux scolaires ou salles de conférences, dans les bureaux où l'on travaille sur clavier et écran ;
- **750 lux** dans les bureaux de dessin industriel...

3. Elle développe **deux mesures contre l'éblouissement** :

- **L'UGR**, ou « Unified Glaring Rate », qui permet de maîtriser l'éblouissement dû à l'association de plusieurs luminaires. Ce taux s'étend de 10 – non éblouissant – à 30 – très éblouissant. L'UGR est principalement lié au flux lumineux, à la surface d'éclairement et à la répartition de l'éclairement.
- L'angle de **défilement** qui est un angle maximal défini selon la luminance de la lampe : 15° pour celles < 50 kca/m², 20° pour celles de 50 à < 500 kca/m², 30° pour celles > 500 kca/m².

L'éclairage représente 12 % des consommations électriques annuelles

Sur les quelque 475 TWh d'énergie électrique consommés annuellement en France, 56 TWh sont absorbés par l'éclairage :

- la part du résidentiel est de 11 TWh ;
- celle de l'éclairage extérieur public est de 7 TWh ;
- l'éclairage intérieur public (santé, enseignement, sport, culture et administration) compte pour 15 TWh ;
- l'éclairage intérieur privé (bureaux, cafés, hôtels, restaurants, commerces et industrie) affiche une consommation de 23 TWh.

Source : RTE, Ademe, Syndicat de l'éclairage.

L'AIR

Un besoin permanent de renouvellement d'air

Tous les bâtiments doivent être ventilés. Non occupés, les environnements intérieurs connaissent naturellement le développement de micro-organismes, une dégradation de matières organiques et odorantes... Occupés, les volumes construits accumulent aussi la vapeur dégagée par le corps humain (de 50 à près de 400 g/h selon l'activité), le CO₂ produit par la respiration, les composés organiques volatiles émis par les produits et les différentes activités : mobilier, imprimantes, procédés industriels... Le renouvellement de l'air participe au maintien d'un air sain et agréable dans ces environnements.

Selon leur destination, les locaux sont soumis à différentes réglementations.

> Arrêté du 24 mars 1982 modifié le 28 octobre 1983

Les constructeurs de logements individuels ou collectifs se réfèrent à l'arrêté du 24 mars 1982 modifié le 28 octobre 1983. Il prescrit une ventilation générale et permanente (tableau 3.1).

Les autres locaux (tertiaires, industriels, commerciaux, sportifs) répondent au règlement sanitaire départemental type (RSDt) ou au Code du travail.

> Règlement sanitaire départemental type (RSDt) et Code du travail

Dans les locaux à pollution non spécifique, un débit d'air neuf est à introduire par une ventilation mécanique selon le RSDt (tableau 3.2).

Le règlement sanitaire départemental type impose aussi :

- une limite de concentration en CO₂ de 1 000 ppm (avec une tolérance jusqu'à 1 300 ppm) dans les locaux pour non-fumeurs ;
- une ventilation minimale en dehors de l'occupation, sans jamais atteindre la concentration maximale en CO₂, elle peut être également modulée ou interrompue ;
- l'interruption de la ventilation après occupation et après abattement de la pollution au CO₂.

Dans les locaux à pollution non spécifique tels les bureaux et les lieux de travail, l'aération naturelle par les fenêtres ou autres ouvrants est autorisée par le Code du travail (Art. R 4222-5) :

- si le travail physique est léger, le volume par occupant du local doit être égal ou supérieur à 15 m³ ;
- sinon, il doit être de 24 m³.

Quant aux salles de réunion, de spectacle, de culte, clubs, foyers, locaux de vente ou de restauration..., le RSDt admet la ventilation par introduction d'air neuf par les ouvrants extérieurs (portes et fenêtres) sous réserve d'un volume minimal de 6 m³ par occupant (tableau 3.2).

Dans les locaux à pollution spécifique, les concepteurs déterminent le débit de ventilation selon la nature et la quantité de polluants. Il s'agit de sites qui peuvent contenir des sources de micro-organismes pathogènes ou d'émissions nocives, du moins gênantes (odeurs...), sous forme gazeuse, d'aérosols ou de liquides. Cependant, pour les salles de bains, douches, cabinets d'aisance et cuisines, le débit d'air est précisé par le règlement sanitaire départemental type (RSDt) (tableau 3.4).

La ventilation naturelle par les portes et fenêtres (tableau 3.3) est aussi admise sous conditions :

- d'une surface minimale des cabinets d'aisance de 5 m² par occupant potentiel ;
- et, pour les locaux d'activité :
 - qu'il ne soit pas nécessaire de capter les polluants au point de production-émission (fumées de soudure, peinture...), ce en raison du risque d'inversion du flux aéraulique,
 - et que le débit d'air extrait soit inférieur à 1 l/s/m³ de local.

La réglementation est fixée par les articles R 4212-1 à R 4212-7, et R 4222-4 à R 4222-9 du Code du travail. Ces textes demandent :

- d'assurer « le renouvellement de l'air en tous points des locaux » ;
- de ne « pas provoquer, dans les zones de travail, de gêne résultant notamment de la vitesse, de la

Type de logement	Débit total minimal		Cuisine		Salle de bains		WC	
	Système à débit continu	Système à modulation de débit et sous avis technique	Débit minimal	Débit de pointe	Principale	Autre salle d'eau	Si unique	Si multiple
T1	35	10	20	75	15	15	15	15
T2	60	10	30	90	15	15	15	15
T3	75	15	45	105	30	15	15	15
T4	90	20	45	120	30	15	30	15
T5	105	25	45	135	30	15	30	15
T6	120	30	45	135	30	15	30	15
T7	135	35	45	135	30	15	30	15

Tableau 3.1 : Débits d'air extrait (en m³/h) minimaux des logements selon l'arrêté du 24 mars 1982, modifié le 28 octobre 1983

Destination des locaux		Débit d'air neuf en m ³ /h et par occupant
Locaux d'enseignement	classes, salles d'études, laboratoires (à l'exclusion de ceux à pollution spécifique) maternelle, primaire et secondaire du 1 ^{er} cycle	15
	classes, salles d'études, laboratoires (à l'exclusion de ceux à pollution spécifique) secondaire du 2 ^e cycle et universitaire	18
	classes, salles d'études, laboratoires (à l'exclusion de ceux à pollution spécifique), ateliers	18
Locaux d'hébergement : chambres collectives (plus de 3 personnes), dortoirs, cellules, salles de sport		18
Bureaux et locaux assimilés : locaux d'accueil, bibliothèques, bureaux de postes, banques		18
Locaux de réunion : salles de réunions, de spectacle, de culte, clubs, foyers		18
Locaux de restauration : cafés, bars, restaurants, cantines, salles à manger		22
Locaux à usage sportif	par sportif dans une piscine	22
	par sportif dans les autres locaux	25
	par spectateur	18
Locaux à présence épisodique (dépôts, archives, halls...) ; locaux ne permettant pas une ventilation par les locaux adjacents		0,1 l/s/m ²

Tableau 3.2 : Débit d'air neuf à introduire dans les locaux à pollution non spécifique selon le Règlement sanitaire départemental

température et de l'humidité de l'air, des bruits et des vibrations » ;

- de « ne pas entraîner d'augmentation significative des niveaux sonores résultant des activités envisagées dans les locaux ».

Les débits demandés pour un renouvellement d'air conforme d'un point de vue sanitaire dans les bureaux et locaux d'activité sont :

- bureaux, locaux sans travail physique : 25 m³/h par occupant ;
- locaux de restauration, locaux de vente, locaux de réunion : 30 m³/h par occupant ;
- ateliers et locaux avec travail physique léger : 45 m³/h par occupant ;
- autres ateliers et locaux : 60 m³/h par occupant.

Pour évacuer la charge thermique, le taux de renouvellement d'air doit être très supérieur : de 8 à 10 volumes par heure.

Ainsi, pour un bureau de 20 m² et de 2,5 m de hauteur sous plafond, soit 50 m³, le débit de renouvellement d'air sera de 400 à 500 m³/h !

> Autre source

Dans l'attente de l'évolution des textes réglementaires, l'Iceb (Institut pour la conception écoresponsable du bâti) préconise, dans son guide Bio-Tech intitulé « Ventilation naturelle et mécanique », une évolution sensible des débits pour le renouvellement de l'air à des fins hygiéniques :

- en non-résidentiel classique (bureaux, enseignement) : au moins 30 m³/h.personne et 1 volume/heure ;

- en résidentiel : au moins 30 m³/h.personne et 0,5 volume/heure.

Quelles techniques disponibles pour ventiler naturellement ?

Le recours à la ventilation naturelle présente pour avantage de pouvoir associer des équipements classiques et des solutions techniques à la fois peu onéreuses et peu contraignantes en termes architecturaux.

> Les équipements muraux et de toiture

Ces solutions sont désormais largement développées dans les catalogues des fournisseurs :

- des grilles de façade (certaines, toute hauteur de la pièce) et des châssis d'aération pour une ventilation transversale, en exploitant la pression et l'écoulement exercés par les vents dominants,
- des menuiseries équipées de boîtiers de commande d'ouverture proportionnée,
- des cheminées de ventilation utilisant le principe du tirage thermique (certains modèles pouvant être associés aux conduits de lumière verticaux),
- des bouches sur menuiseries, etc.,
- des lanterneaux à commande d'ouverture manuelle ou automatisée...

> La ventilation naturelle hybride

Dite aussi « ventilation naturelle assistée et contrôlée », la ventilation naturelle hybride mixe les principes de la ventilation naturelle – extraction de l'air vicié par

convection – et l'apport technique de la ventilation mécanique – le maintien du débit à l'aide d'un extracteur.

Son intérêt est technique, énergétique et financier :

- les débits d'air sont assurés tout en étant partiellement contrôlés ;
- les coûts d'installation et d'exploitation sont réduits ;
- l'équipement est limité à l'extracteur et à sa commande, il n'y pas de gaine spécifique à poser, et l'entretien est réduit ;
- les consommations d'énergie de l'équipement sont faibles : environ -30 à -35 % par rapport à une ventilation mécanique simple flux...

> La déstratification

L'air chaud monte, l'air froid descend... Cette solution de traitement d'air par brassage est bien connue : elle est employée pour traiter les grands halls (aéroports,



Figure 3.5 - Les ventilateurs dédiés à la déstratification ont fait leurs preuves en industrie et en logistique.

Surface du local en m²	Surface des ouvrants en m²
10	1,25
50	3,6
100	6,2
150	8,7
200	10
300	15
400	20
500	23
600	27
700	30
800	34
900	38
1000	42

Tableau 3.3 : Surface des ouvrants en fonction de la surface du local (sauf pour les locaux d'enseignement) selon le Règlement sanitaire départemental type

Type de local	Débit	
Pièces à usage individuel	Salle de bains ou de douches	15 m³/h/local
	Salle de bains ou de douches commune avec cabinet d'aisances	15 m³/h/local
	Cabinet d'aisances	15 m³/h
Pièces à usage collectif	Cabinet d'aisances	30 m³/h
	Salle de bains ou de douches isolée	45 m³/h
	Salle de bains ou de douches commune avec un cabinet d'aisances	60 m³/h
	Bains, douches et cabinets d'aisances groupés	(30 + 15 × N*) m³/h
	Lavabos groupés	(10 + 5 × N*) m³/h
	Salle de lavage, séchage et repassage du linge	5 m³/h/m²
Cuisine collective	Office, relais	15 m³/h/repas
	< 150 repas servis simultanément	25 m³/h/repas
	150 à 500 repas servis simultanément	20 m³/h/repas
	501 à 1 500 repas servis simultanément	15 m³/h/repas
	> 1 500 repas servis simultanément	10 m³/h/repas

Tableau 3.4 : Débit minimal d'air neuf à introduire pour les toilettes, les cuisines collectives et leurs dégagements selon le Règlement sanitaire départemental type

*N : nombre d'équipements dans le local. © Bernard Réinbeau

salles de spectacles, gymnases...). Elle consiste à pratiquer un soufflage capable de provoquer un ample mouvement de l'air – du plafond aux murs extérieurs puis jusqu'au sol – ce qui a pour effet d'homogénéiser la température de l'air ambiant et de diminuer les effets de paroi froide, sans que le courant d'air soit ressenti par les occupants. Pour les ateliers et sites industriels ou logistiques, des fournisseurs proposent des ventilateurs de plafonds de très grands diamètres – de 2 à 10 m ! – et à rotation lente (Fig. 3.5). Leur efficacité est avérée.

> Le puits climatique (canadien ou provençal)

Ce principe ancestral consiste à tempérer l'air extérieur en le faisant circuler dans une gaine étanche dans le sol. Ce réseau placé entre 1 et 3 m de profondeur écriète ainsi la température de l'air neuf par rapport à celle de l'air extérieur. En hiver, cette installation permet de relever la température de l'air neuf de quelques degrés, et en été, de l'abattre d'autant. Cet équipement demande un important travail de conception, de génie civil et d'entretien.

> La ventilation adiabatique ou rafraîchissement par évaporation

Utilisée à partir d'équipement indépendant ou en association avec une centrale de traitement d'air simple ou double flux, cette technique a pour grand intérêt d'assurer à la fois la ventilation et le rafraîchissement (Fig. 3.6). Le principe consiste à humidifier le média filtrant placé dans la veine d'air pour atteindre les températures et l'hygrométrie demandées dans le volume.

Son intérêt est de souffler en permanence un air neuf rafraîchi pour maîtriser les températures intérieures en été, de contrôler l'humidité relative (Fig. 3.7) – entre 50 et 60 % – et de réduire les coûts énergétiques de rafraîchissement. Ses applications s'étendent à de très nombreux domaines : industrie, logistique, surfaces de vente, locaux tertiaires, salles de sports, écoles... Lorsqu'ils sont positionnés au niveau du soufflage les modules



Figure 3.6 - Les systèmes de ventilation adiabatique assure une ventilation permanente efficace et une fonction de rafraîchissement à très faible coût global.

adiabatique permettent en hiver de ramener l'humidité de l'air à un niveau acceptable.

> La façade ventilée, les atriums et les espaces tampons

Ces solutions architecturales sont des espaces non chauffés en contact avec l'enveloppe du bâtiment ou de locaux chauffés. Elles permettent d'écriéter les températures extérieures, en été et en hiver, par l'effet du mouvement d'air dans les volumes créés.

Les concepteurs distinguent :

- les espaces où l'air neuf ne fait que traverser ce volume, sans entrer dans l'espace intérieur, c'est le cas des combles ;
- les espaces où l'air neuf introduit dans le volume tampon est repris dans l'espace intérieur : façades ventilées, vérandas...

De même, en raison de la différence des apports, il faut distinguer les espaces :

- solarisés dont l'enveloppe est composée, en totalité ou en partie, de baies (doubles façades, doubles fenêtres, vérandas, atriums, serres, jardins d'hiver) et qui bénéficient ainsi d'un double apport gratuit, par l'air et par le rayonnement solaire (Fig. 3.8) ;
- non solarisés car composés de parois opaques (par exemple combles, garages et parkings, celliers, circulations, locaux techniques...) et qui exploitent les apports gratuits par l'air.

Ces solutions présentent un triple intérêt :

- **thermique** car elles corrigent les coefficients de transmission surfaciques et linéiques des parois des pièces chauffées et permettent ainsi de réduire les déperditions et de prévenir des phénomènes de condensation en surface des parois (précurseur du développement de moisissures) ;
- **aéraulique et thermique** puisque l'air est préchauffé en hiver – à ce titre, dans les zones climatiques du nord de la France, le rendement en termes d'apports gratuits est supérieur à celui des zones sud du fait de la plus longue durée de la période de chauffage –,



Figure 3.8 - Les baies seront choisies pour leur clair de vitrage maximal.

et est tempéré en été... à condition d'installer des protections solaires, au risque de surchauffe ;

- **acoustique**, car ces espaces abattent le niveau de bruit extérieur dans les pièces occupées.

Des enjeux en phase avec les préoccupations environnementales

Quelque peu maintenue en marge des réflexions des concepteurs de bâtiments, et trop souvent déconsidérée par les applicateurs, la ventilation naturelle a pourtant poursuivi un développement de son expertise. En témoigne tout récemment, le choix de l'architecte Renzo Piano pour la conception de l'ouvrage de plus de 200 m de long et de trois niveaux de la future École normale supérieure de Paris-Saclay (fig.3.9) : la dalle de béton de chaque niveau est composée d'épais caissons traversants permettant de fournir une ventilation naturelle dans les salles d'enseignement, dans les bureaux et dans l'atrium central.



Figure 3.9 - L'ENS de Paris-Saclay en chantier. En façade, des vantaux régulent la ventilation naturelle de la plus grande partie de cet ouvrage (Renzo Piano Architecte).

Ce mode de ventilation a pour objet d'abaisser le coût énergétique de la ventilation et du traitement d'air, que ce soit en supprimant ou réduisant les consommations d'énergie liées aux équipements des caissons de ventilation, ou en optimisant le fonctionnement des centrales de ventilation double flux avec une unité complémentaire adiabatique... Ces solutions permettent de travailler par des températures extérieures élevées, et même avec portes et fenêtres ouvertes...

Dans de nombreux cas, ces solutions peuvent permettre d'éviter le recours à la climatisation, par système à détente directe ou autre, ce qui présente des intérêts énergétiques et environnementaux :

- les équipements – menuiseries, ventilateurs, caissons adiabatiques... – sont techniquement simples à installer, à faire fonctionner et à entretenir ;

- les coefficients de performance des systèmes les plus pointus, tel l'adiabatique, peuvent atteindre des niveaux très élevés, généralement au-delà de 50 kW de rafraîchissement pour 1 kW absorbé, et jusqu'à 100/1 lorsqu'ils sont ajoutés à un système de ventilation existante ;
- les besoins énergétiques faibles permettent de mieux maîtriser les postes de coût d'abonnement et d'achat d'électricité ;
- les débits d'air peuvent être contrôlés à l'aide de régulations et de moteurs à vitesse variable ;
- les exploitants se libèrent des problématiques de gaz réfrigérants en choisissant des fluides courants : de l'air, et, dans les solutions adiabatiques, de l'eau, parfois même de l'eau de pluie. L'eau utilisée n'étant ni perdue, ni polluée par le principe naturel d'évaporation.

Ces techniques de ventilation conviennent aussi pour maintenir la qualité d'air intérieur. La maîtrise du renouvellement d'air par le balayage des volumes traités assurent l'élimination des pollutions « basiques » (humidité, CO₂) mais aussi des particules, des composés organiques volatiles...

Une souplesse et des précautions impératives...

Comment calculer les systèmes de ventilation naturelle en synergie avec l'enveloppe ? Ce sujet anime la communauté des ingénieurs depuis près de 20 ans. Déjà en 2003, le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) a produit un guide technique sur les « Systèmes de climatisation à faible consommation d'énergie » (Cahier du CSTB n° 3454).

Le chapitre « Solutions techniques » du guide Bio-tech « Ventilation naturelle et mécanique » de l'Arene IdF et de l'ICEB (2016) rassemble des éléments de conception technique pour les constructions résidentielles ou tertiaires.

Récemment, le programme Pacte – ex Rage (Règle de l'art Grenelle de l'Environnement) – a permis de revisiter de nombreux sujets pour tenir compte des impératifs réglementaires et de savoir-faire (www.programme-pacte.fr/catalogue) (Voir détails dans la rubrique « Pour en savoir plus »).

> Concevoir des bâtiments adaptés à la ventilation naturelle

Selon le guide Bio-Tech de l'Arene IdF et de l'ICEB (voir « Pour en savoir plus »), la ventilation naturelle est contrainte :

- par la géométrie des pièces :
 - pour une ventilation mono exposée :

- > avec une ouverture unique en façade, la profondeur doit se limiter à 2 fois la hauteur sous plafond ;
- > avec deux ouvertures placées à des hauteurs différentes, la profondeur doit se limiter à 2,5 fois la hauteur sous plafond, avec une différence de hauteur entre l'entrée et la sortie de 1,5 m ;

(NB : Les auteurs du guide Bio-Tech « Ventilation naturelle et mécanique » proposent des formules d'estimation des débits.)

- pour une ventilation traversante : avec une ouverture sur une façade et une ouverture sur autre façade, la profondeur de la pièce doit être inférieure ou égale à 5 fois la hauteur sous plafond ;

- par l'orientation des façades et le potentiel de vent ;
- par l'environnement du bâtiment (rugosité du terrain, effets de masque...).

Pour limiter les pertes thermiques, les concepteurs prennent aussi en compte le fonctionnement en période hivernale.

> Apprécier l'inertie du bâtiment

Les effets de la ventilation naturelle et la stratégie de régulation diffèrent selon les caractéristiques d'inertie thermique des parois des ouvrages. Ce comportement s'apprécie selon plusieurs critères : les températures extérieures et intérieures, la consigne intérieure et les apports internes et gratuits.

Une inertie forte, liée à l'usage de matériaux lourds et avec une isolation thermique épaisse, se traduit par une régularité de température intérieure au regard des variations durant le jour ou la nuit ; ce type de construction évite les surchauffes en été, et permet de bénéficier des apports gratuits en demi-saison et en hiver.

Une inertie faible tient essentiellement à l'emploi de matériaux à faible capacité d'absorption du flux d'énergie (bois, matériaux isolants) et par une variation forte en fonction de ces flux ; elle exige une régulation

fine pour maintenir une température intérieure plus régulière.

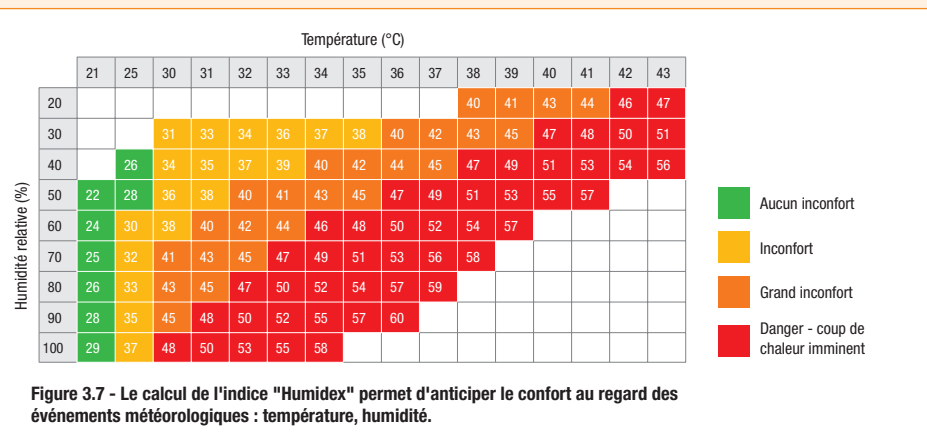
> Choisir les solutions de ventilation naturelle adaptées

Les concepteurs doivent en permanence tenir compte d'exigences contradictoires. À savoir : assurer le confort thermique, la qualité d'air intérieur tout en maîtrisant les consommations d'énergie... Et toujours selon des préoccupations technico-économiques...

Menuiseries de façade adaptées, double façade, lanterneau, brassage d'air, cheminées, atrium, extracteur pour fonctionnement hybride, rafraîchissement adiabatique... Les choix techniques seront calculés et simulés informatiquement sur la base des débits à atteindre et des critères de confort. Les ingénieurs se préoccupent d'une prise en compte globale de l'ouvrage – l'enveloppe, les équipements et ses occupants – afin de proposer une garantie de résultat.

Il est courant de dire que « l'air est paresseux », qu'il s'échappe par les infiltrations parasites qui perturbent les débits... Les concepteurs et constructeurs doivent donc respecter les règles d'étanchéité à l'air, d'équilibrage et de débit.

L'accent est mis sur une simulation rigoureuse de l'installation de manière à traiter les cas possibles d'inconfort : condensation en été, inertie de l'enveloppe, difficulté de déchargement de la chaleur lors de longues périodes de canicule, possibilité de free-cooling en demi-saison, de night-cooling – dite aussi ventilation intensive provisoire – en été pour décharger la chaleur stockée durant la journée et bénéficier du déphasage de la fraîcheur accumulée durant la nuit 8 à 12 heures plus tard, préchauffage de l'air en hiver... L'une des réponses concrètes à ce besoin de qualité est la définition d'un schéma de régulation. Ce schéma devra également tenir compte de données météorologiques concernées.



Éclairage et ventilation naturels revendiquent de multiples bénéfices : le confort des occupants, le choix de moyens techniques courants et facilement accessibles, une réduction des coûts d'investissement et d'entretien...

Leur intérêt réside aussi dans leur souplesse d'usage et dans l'appropriation de leur fonctionnement par les usagers et les exploitants. Selon le bâtiment et son niveau d'équipement, toutes les solutions de régulation et de contrôle sont proposées.

Les solutions possibles

> La détection de présence

Relier une protection solaire et un éclairage artificiel à un tel type de sonde est un classique de l'équipement des bâtiments. La sonde de détection de présence peut être associée à celles d'éclairage et d'ombrage, ainsi qu'à une gradation de la lumière artificielle et ce de manière à maintenir le niveau d'éclairage sur la zone de travail au point de consigne (300 ou 500 lux).

> Les sondes de température, d'humidité et de CO₂

Comme les systèmes de ventilation mécanique, plusieurs modes de ventilation naturelle – hybride, adiabatique – fonctionnent de manière optimale avec une régulation adaptée sur ces critères de confort fondamentaux.

Les gestionnaires de fonction

> Pour la ventilation naturelle

Une « ventilation naturelle intelligente » peut être appliquée à la ventilation naturelle, à la ventilation hybride et à la ventilation adiabatique. Son intérêt est d'exploiter les moyens techniques existants pour le désenfumage et la sécurité incendie – qui demeurent prioritaires – pour améliorer le confort intérieur : température, hygrométrie, élimination des COV et CO₂... Sans investissement lourd, cette synergie de moyens ouvre des possibilités de rafraîchissement et chauffage naturels (free cooling, free heating, night cooling). L'exploitation d'une base de données météo annuelle permet d'anticiper la position des ouvrants.

> Pour l'éclairage naturel

La « solution d'ombrage intelligente » permet d'automatiser les équipements solaires (stores, brise-soleil extérieurs...) et l'éclairage artificiel.

Pour améliorer le rendement d'économie d'énergie en fonction de l'occupation des locaux, ce gestionnaire dispose d'une programmation journalière, hebdomadaire et annuelle.

> Pour les façades rideaux

Pour être efficace en termes d'éclairage, de ventilation et de confort thermique, ces doubles peaux (Fig. 4.1) doivent être munies d'automatismes de pilotage des ouvrants afin de disposer d'une « façade bioclimatique intelligente » : exploiter les apports gratuits en hiver et en demi-saison, éviter la surchauffe en été... Leur intérêt peut être renforcé par l'association avec les deux précédentes fonctions de gestion, en version multizones et avec une gestion à l'aide d'un navigateur pour site Internet.

Les solutions de gestion technique de bâtiment

> Solutions en construction neuve ou en rénovation

La maîtrise des fonctions techniques des bâtiments, quelle que soit leur taille, repose sur une gestion globale.

Des kits complets avec calculateur simplifient les installations :

- Exemple 1 : une station météo reliée à un ensemble de sondes (températures et hygrométries intérieures et extérieures, la mesure de CO₂ et COV, des détecteurs de présence, de pluie et de vent) commande des ouvrants de façade ;
- Exemple 2 : dédié à la ventilation et à la lumière naturelles des bâtiments disposant d'un atrium, un système associe une centrale « pluie et vent », plusieurs sondes de températures intérieure et extérieure – dont certaines à communication radio, et les autres, filaires – afin de commander des ouvrants de façades et des boîtiers à chaîne. Cette solution a pour intérêt de gérer la déstratification dans ces volumes.
- Exemple 3 : conçue pour les locaux industriels et logistiques, cette autre solution adopte les mêmes moyens de mesure (centrale météo, sonde de température et d'hygrométrie) pour piloter les lanterneaux de désenfumage, les tourelles à ventelles ou les ouvrants sur sheds ainsi que tous types de systèmes d'ombrage. Elle se veut robuste (peu sujette aux pannes) et très réactive aux événements météo. Basée sur des équipements classiques dans ce type de construction, elle est aussi économe en investissement et en exploitation, tout en améliorant le confort et en réduisant les dépenses d'énergie pour l'éclairage.

> Les applications bâtiment dites « classiques »

Ces modes de fonctionnement trouvent aussi des solutions de contrôle-commande classiques dans les locaux non résidentiels :

- solutions sans fil radio et sans énergie au standard EnOcean, notamment pour la rénovation ;
- sous protocoles de communication courants – BacNet, ou Modbus – pour intégrer ces fonctions d'éclairage et de ventilation naturels dans le périmètre de la régulation globale des ouvrages.

Ces solutions permettent à la ventilation et à l'éclairage naturel de s'intégrer complètement à la gestion technique des bâtiments. Elles donnent aux concepteurs la possibilité d'intégrer les équipements des fournisseurs mondiaux (Energy Management Solution ou Ecos 5 de Sauter, les contrôleurs programmables, capteurs et sondes de Carel, les

Pour tirer pleinement parti des équipements

automates Saia d'Honeywell, les régulations de température Synco de Siemens...).

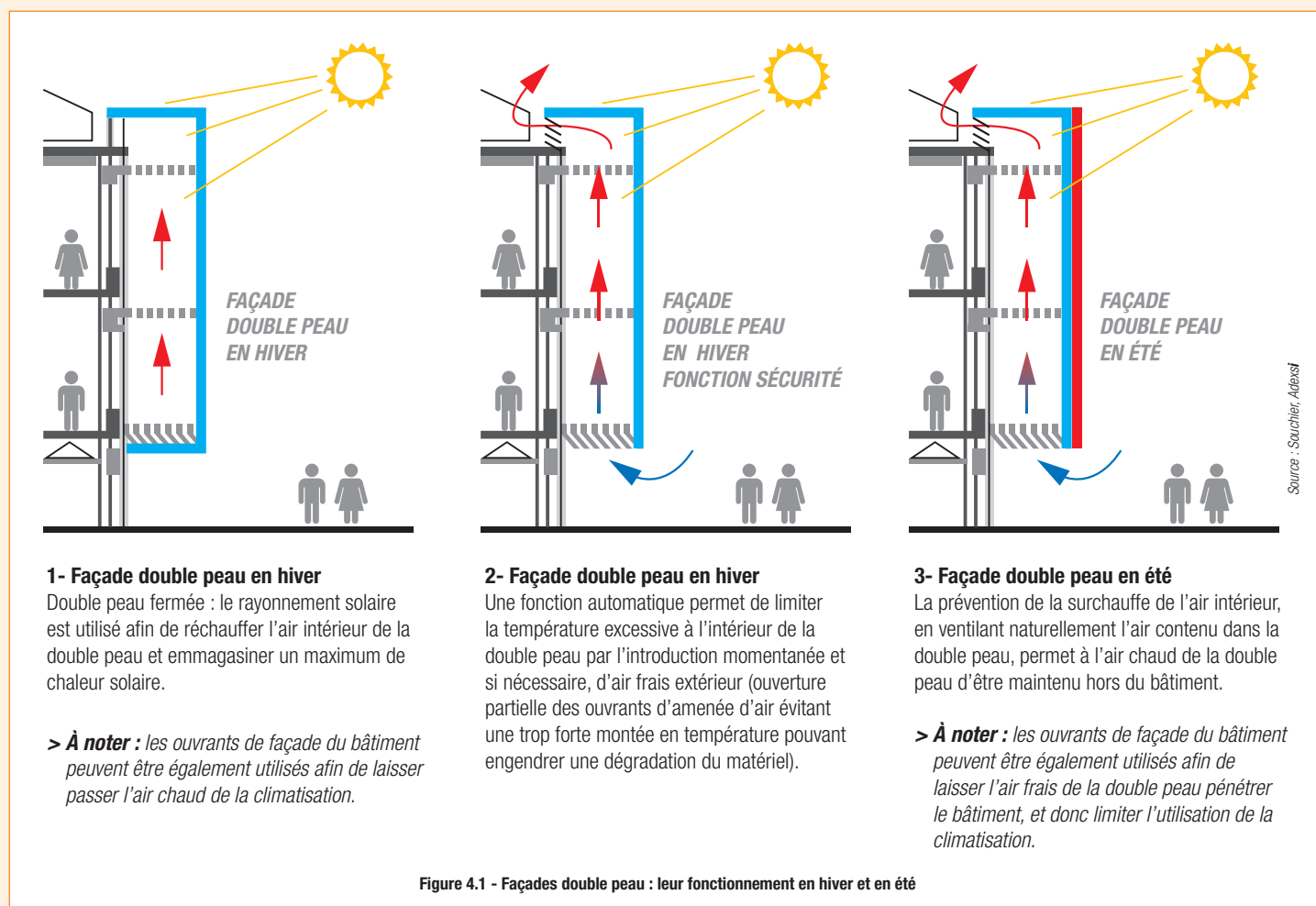
> Comment suivre la performance de ses installations de gestion technique ?

Quelle que soit la solution technique choisie, l'exploitant et l'utilisateur souhaitent avoir la main sur leurs équipements et maîtriser leur fonctionnement...

À distance, les serveurs web donnent accès aux données, synoptiques, alarmes et défauts.

Après avoir intégré les commandes sans fil et sans énergie ainsi que les outils web, les solutions de confort naturel adoptent aussi les standards des objets connectés.

Une voie indispensable pour diffuser largement leurs bénéfices.



Réglementation

- Directive (UE) 2018/844 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018, modifiant la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments et la directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique, *JOUE* du 19 juin 2018.
- Décret n° 83-721 du 2 août 1983 complétant le code du travail (2e partie) en ce qui concerne l'éclairage des lieux de travail, *JO* du 5 août 1983.
- Décret n°83-722 du 2 août 1983 complétant le code du travail (2e partie) et fixant les règles relatives à l'éclairage des lieux de travail auxquelles doivent se conformer les maîtres d'ouvrage entreprenant la construction ou l'aménagement de bâtiments destinés à l'exercice d'une activité industrielle, commerciale ou agricole, *JO* du 5 août 1983.
- Décret n° 2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public, *JO* du 4 décembre 2011.
- Arrêté du 22 mars 2017 modifiant l'arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants, *JO* du 25 mars 2017.
- Circulaire ministérielle du 11 avril 1984 relative au commentaire technique des décrets n°s 83-721 et 83-722 du 2 août 1983 relatifs à l'éclairage des lieux de travail, *JO* du 11 mai 1984.
- Circulaire DRT n°90/11 du 28 juin 1990 relative à l'éclairage naturel et à la vue vers l'extérieur.
- Circulaire DRT n°95/07 du 14 avril 1995 relative aux lieux de travail (texte non paru au *JO*).

Normes

- ISO 7730:2005 (novembre 2005) : Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.
- NF EN 17037 (septembre 2016) : L'éclairage naturel des bâtiments.
- NF EN 12464 1 (juillet 2011) : Lumière et éclairage – Éclairage des lieux de travail – Partie 1 : lieux de travail intérieurs.
- NF EN ISO 7730 (mars 2006) : Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.

À suivre : les travaux de la norme expérimentale *NFX 35 103* sur les principes d'ergonomie applicables à l'éclairage des lieux de travail en tenant compte de l'âge des occupants, de la tâche visuelle et des situations à risques.

- NF EN ISO 8996 (février 2005) : Ergonomie de l'environnement thermique - Détermination du métabolisme énergétique.

Ouvrages

- *Le guide de l'éclairage naturel zénithal pour les bâtiments industriels, commerciaux et tertiaires*, ouvrage collectif du GIF Lumière réalisé en partenariat avec l'Ademe et le Syndicat de l'éclairage, coordonné par Bernard Lepage, avril 2018

- *La ventilation naturelle en pratique*, par Jacques Gaudemer, Instituto Architectura Tropical, PDF mis en ligne en novembre 2015.
- *Conception de bureaux bioclimatiques*, guide technique réalisé par le Cegibat, l'association ICO et l'Unfsa, Éditions Cegibat (2016).
- les *guides Bio-Tech* rédigés par l'Arene Île-de-France et l'Iceb, publiés en 2014 (<http://www.asso-iceb.org/documents/guide-biotech/>).
- *Performance énergétique* :
 - Volume 1 : *les matériaux et procédés d'isolation*, par S. Bouché et A. Delaire, CSTB Éditions (2013).
 - Volume 2 : *chauffage, ECS, électricité, ventilation*, ouvrage collectif du CSTB, CSTB Éditions (2016).
- *Traité de construction durable*, sous la direction de Daniel Bernstein, Éditions Le Moniteur (2007).
- *Le Guide de l'habitat sain : Les effets sur la santé de chaque élément du bâtiment*, par Suzanne et Pierre Déoux, Éditions Médiéco (2002).

Sites Internet

> Conseils élémentaires pour la conception des bâtiments performants :

- Le site de l'Agence Qualité Construction, et particulièrement le dispositif « REX Bâtiments performants » : <http://www.programmepacte.fr/dispositif-rex-batiments-performants>.

Le lecteur s'orientera vers les rapports thématiques d'observations, notamment celui sur l'ambiance lumineuse, et vers la mallette pédagogique : <http://mallette-pedagogique-bp.programmepacte.fr>

- Le site du programme Pacte (Programme d'action pour la qualité de la construction et la transition énergétique) : www.programmepacte.fr/catalogue

À consulter sur ce site :

- la recommandation professionnelle « Verrières » de septembre 2013 ;
- le guide « Doubles fenêtres » d'avril 2014 ;
- le guide « Ventilation hybride » de mars 2015 ;
- le guide « Façade multiple » de février 2014 ;
- les guides sur les « Puits climatiques » de mars 2015 (conception, dimensionnement, installation, mise en œuvre et maintenance) ;
- le calepin de chantier « Puits climatiques en habitat individuel et en tertiaire » de janvier 2017.

- Le site de l'association Effinergie pour télécharger les règles techniques des labels BBC, Bepos Effinergie et Bepos+ Effinergie associés à l'expérimentation E+C- : <https://www.effinergie.org/web/association>

- Le site Énergie Plus, outil d'aide réalisé par le département « Architecture et climat » de l'Université catholique de Louvain, en Belgique : <https://www.energieplus-lesite.be>

- Le site « Guide Bâtiment Durable » développé par Bruxelles Environnement en collaboration avec des bureaux d'études spécialisés : <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/>

- Le site du groupe Adexsi, et la présentation de ses activités : <https://www.adexsi.fr>

> Réglementation thermique :

- La réglementation thermique dans le neuf et dans l'ancien : <https://www.rt-batiment.fr>

- La politique de réduction des consommations énergétiques et de confort dans le bâtiment : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/politiques/batiments-et-regles-construction>

- Le site de préfiguration de la prochaine réglementation environnementale E+C- : <http://www.batiment-energiecarbone.fr>, avec notamment les modules de formation contenus dans la « mallette pédagogique » dédiée https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSc0KtXR5PgobvupB0ZpCQK102_3sjrdsW4IYQeRunyFXqD6WQ/view-form

> La lumière naturelle :

- Le site du GIF Lumière : <https://www.gif-lumiere.com>
- Le site de l'Association française de l'éclairage (AFE) : <http://www.afe-eclairage.fr>

