



Livre Blanc

# GIE Enjeu Energie Positive

---

## Confort et Santé dans les immeubles de bureaux énergétiquement performants

Approche globale et Interactions entre confort et performance énergétique



Membres et partenaires du **GIE Enjeu Energie Positive** :  
Bouygues Immobilier, Philips, Siemens, Schneider, Steelcase, Ciat

# Sommaire

<b>Préambule</b> .....	<b>3</b>
<b>Un livre blanc : pourquoi, pour qui ?</b> .....	<b>4</b>
<b>Contributeurs au livre blanc</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Enjeux et constats</b> .....	<b>5</b>
1.1 Le confort : un enjeu financier majeur .....	5
1.2 Un enjeu concurrentiel.....	6
1.3 Une nouvelle répartition des consommations énergétiques à maîtriser.....	7
1.4 Intégrer les usages et les utilisateurs .....	8
<b>2 Définition du confort</b> .....	<b>9</b>
2.1 Les trois niveaux de confort.....	9
2.1.1 La recommandation du GIE .....	10
2.1.2 Le confort fonctionnel.....	11
2.1.3 Le confort psychologique .....	12
2.2 Le confort des espaces de travail.....	13
2.3 Confort Thermique.....	15
2.4 Qualité de l'air intérieur.....	15
2.5 Confort visuel.....	15
2.6 Confort acoustique .....	16
<b>3 Confort et optimisation énergétique</b> .....	<b>17</b>
3.1 Couplage confort thermique et besoins énergétiques .....	17
3.2 Couplage Qualité de l'Air Intérieur (QAI) et besoins énergétiques.....	17
3.3 Couplage confort visuel et besoins énergétiques.....	18
3.4 Couplage confort acoustique et besoins énergétiques.....	19
<b>4 Recommandations &amp; Perspectives</b> .....	<b>20</b>
4.1 Les 5 facteurs de performance.....	20
4.2 Eléments de programmation à respecter à partir de technologies déjà disponibles .....	21
4.2.1 Espaces de travail .....	21
4.2.2 Parties communes.....	22
4.3 Voies d'amélioration .....	22
4.3.1 Techniques dites actives.....	22
4.3.2 Techniques dites passives .....	24
4.4 Accompagnement au changement.....	27
<b>5 Etat des normes, labels et dispositions réglementaires</b> .....	<b>28</b>
<b>6 Annexes</b> .....	<b>29</b>
6.1 Annexe Confort et Performance: Etude de l'INES pour le GIE .....	29
6.2 Annexe Qualité d'Air Intérieur.....	55
6.3 Annexe Confort Visuel .....	72
6.4 Annexe Confort Acoustique.....	79
6.5 Annexe Confort Thermique : Document Homes.....	83
6.6 Comparatif des différents Labels et certification sur les critères de confort .....	
6.7 Article Human Factor: The Bottom Line .....	85
6.8 Etude ENTPE sur le confort visuel .....	
6.9 Rapport CSTB – CERTIVEA – Les Immeubles verts tiennent-ils leurs promesses ? .....	

## Préambule

Les immeubles de bureaux sont des sites de production intellectuelle pour lesquels confort et santé des occupants contribuent durablement à la performance du travail et par voie de conséquence à la valorisation des actifs immobiliers.

Le GIE inscrit le confort de travail dans une démarche qualitative et environnementale très forte, où l'humain est au cœur du système.

L'approche systémique globale du confort (température, acoustique, ergonomie etc) en intégrant l'occupant en tant qu'acteur éco-responsable de son confort est complètement novatrice et n'est possible qu'en mettant en synergie les compétences des membres du GIE et des organismes de recherche européens.

Selon une étude<sup>1</sup> réalisée par Jones Lang Lasalle et Core Net, le critère de performance environnementale est un des critères les plus importants pris en compte pour 50% des directeurs immobiliers, alors que 31% d'entre eux mettent en priorité le critère de santé et productivité.

Faut-il opposer l'un à l'autre ? **Non, l'optimisation de la performance énergétique ne peut faire oublier l'amélioration du bien-être des individus, et réciproquement.** Il est donc nécessaire de réguler au plus juste les ambiances intérieures dans un gage d'efficacité énergétique, sur la base des différents paramètres du confort.

**Viser le bien-être des individus est louable mais aussi financièrement pertinent**, car le niveau de confort ou d'inconfort des utilisateurs d'immeubles de bureaux impacte directement la productivité de leur travail. En conséquence les employeurs ont intérêt à intégrer ce facteur dans leurs choix immobiliers. Dès lors, on comprend aisément que le confort contribue à la valorisation des actifs immobiliers mis sur le marché par les constructeurs, promoteurs et gestionnaires de biens immobiliers.

**Se préoccuper du confort des espaces de travail, c'est donc se préoccuper du confort de l'utilisateur de ces espaces**, lequel devient donc le point central d'une démarche d'amélioration qualitative et environnementale d'un bâtiment, a fortiori à énergie positive.

Or du point de vue de l'utilisateur, **un niveau de confort ressenti résulte d'une perception globale de son environnement.** Vouloir quantifier et qualifier le bien-être d'un ou de plusieurs individus passe donc par l'étude approfondie du « confort global », que l'on a défini comme la combinaison de trois niveaux : le confort physique, le confort fonctionnel et le confort psychologique.

### L'objet du groupe de travail confort du GIE a donc été

- de comprendre comment appliquer à l'échelle de l'immeuble de bureau tout entier, une démarche de conception « ergonomique », centrée sur les besoins des utilisateurs, comme celle mise en œuvre depuis longtemps par les concepteurs de mobiliers de bureau.

- de comprendre s'il suffit d'optimiser « simplement » chacun des paramètres qui définissent le confort pour optimiser cette perception globale, ou si c'est au niveau des interdépendances entre ces paramètres que réside la clé.

Par exemple, un bon niveau acoustique sera à la fois la résultante des propriétés absorbantes des infrastructures du bâti et des matériaux, mais aussi de la logique d'aménagement de l'espace de travail.

- d'étudier le couplage entre énergie et qualité de l'environnement intérieur de façon à maintenir en permanence le meilleur équilibre entre confort des occupants et consommation d'énergie totale du bâtiment

- enfin, d'analyser s'il est réaliste de modéliser ces interdépendances, et si non, de déterminer a minima des grands principes de programmation, qui garantiront le confort, en contribuant à l'atteinte d'une plus grande performance énergétique.

---

<sup>1</sup> 4th Annual Sustainability Survey, New CoreNet Global/Jones Lang LaSalle , February 9, 2011

La notion du confort psychologique étant par ailleurs très complexe et subjective, le GIE n'a pas inclus cette dimension dans son travail, même s'il n'en demeure pas moins indispensable d'intégrer l'occupant en tant qu'acteur éco-responsable de son confort, par des actions d'accompagnement au changement.

Tels sont les thèmes abordés par le GIE dans ce document.

## Un livre blanc : pourquoi, pour qui ?

Ce livre blanc se veut un recueil des notions de confort et qualité des espaces de travail dans des immeubles dont la vocation environnementale est fortement prise en compte.

Il se veut également un ensemble de conseils de mise en œuvre et d'usage pour concilier confort et performance énergétique.

Il s'adresse à toutes les personnes impliquées dans l'élaboration, la gestion et l'utilisation des immeubles de bureaux s'attachant à la performance des lieux de travail et l'empreinte environnementale de ceux-ci.

Architectes, programmistes, investisseurs, promoteurs et sociétés utilisatrices des bâtiments tertiaires.

## Contributeurs au livre blanc

Cet ouvrage est réalisé par le groupe de travail **CONFORT ET SANTE** du **G.I.E. ENJEU ENERGIE POSITIVE**.

Ce groupe de réflexions, piloté par **SIEMENS Building Technologies**, est composé des sociétés membres fondateurs du GIE



**PHILIPS**



**SIEMENS**

**Steelcase**

- SIEMENS : Franck Morillon
- Bouygues Immobilier : Marie Annick Le Bars – Marie Hernandez
- PHILIPS Eclairage : Alain Minet
- Schneider Electric : Olivier Demazure
- Steelcase : Hélène Babok – Catherine Gall
- Intel : Yves Aillerie
- CIAT (partenaire du GIE): Fabrice Rozmiarek



Le **C.E.A** (Commissariat à l'Energie Atomique), au travers de l'**INES** (Institut National de l'Énergie Solaire) et son **Laboratoire Énergétique du Bâtiment** a reçu mission du G.I.E de mener une étude sur la QEI (Qualité Environnementale Intérieure) et son couplage avec la performance énergétique.

**ENTPE** (Ecole nationale des travaux publics d'Etat) de Lyon et le programme **HOMES** aux travers d'études pertinentes sur les sujets abordés et dont nous rendons en annexe le contenu de leurs études.

Il faut noter également les échanges internationaux entre le GIE et les acteurs du projet Oregon Sustainability Center situé à Portland (OREGON USA).

# 1. Enjeux et constats

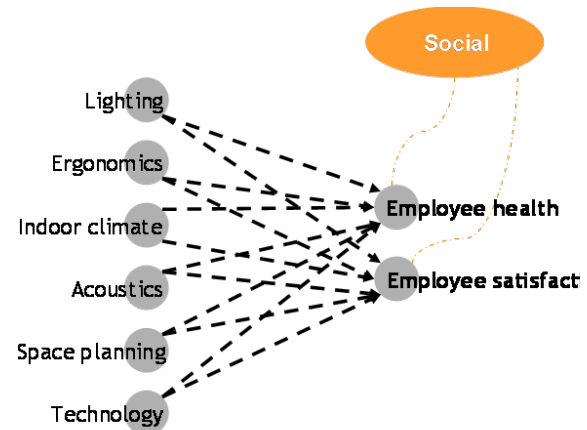
## 1.1 Le confort : un enjeu financier majeur

Toutes les études effectuées depuis 20 ans sur le lien entre confort et productivité mettent en évidence la corrélation indéniable entre ces deux facteurs, en soulignant que **l'environnement physique a une influence considérable sur la satisfaction des utilisateurs et, par voie de conséquence, la performance de l'organisation.**

**Un enjeu de productivité donc un enjeu financier**

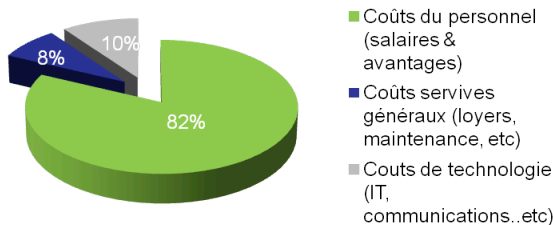
En effet, on comprend intuitivement que les efforts à produire par l'utilisateur pour s'adapter à un environnement inconfortable, se traduisent par une dépense d'énergie qui peut dégrader sa productivité, augmenter sa fatigue et son niveau de stress et par conséquent impacter la productivité de l'entreprise.

C'est cette théorie que défend le Groupe de Recherche sur les Environnements de Travail (GRET) de la Faculté de l'aménagement / Université de Montréal. Fondé par Jacqueline Visser, il prône un investissement « en amont » destiné à améliorer la qualité de l'environnement intérieur pour éviter « en aval » les coûts liés à l'absentéisme, frais de prises en charge de santé, primes d'assurances majorées....



S'il reste difficile de modéliser et quantifier ce lien de façon très fiable et reproductible... il n'en reste pas moins qu'il a été établi **qu'un gain de productivité de 1% représente pour l'entreprise locataire un gain financier équivalent à une baisse de 30% de son loyer.**

[Steelcase SWP., 2007]



**Les coûts salariaux représentent 80% du coût total de fonctionnement d'un bâtiment de bureau (hors foncier)**

L'enjeu financier est d'autant plus important quand on sait que **les coûts salariaux représentent plus de 80% du coût total de fonctionnement d'un bâtiment de bureau hors foncier** sur une période de 10 ans. (conclusions des études de DEGW et de Brillet col., 2001)

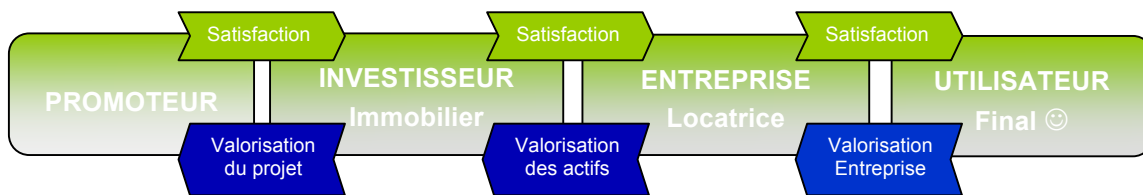
La qualité de « l'ambiance de travail » devient même le socle des « propositions de valeurs » ou Employee Value Proposition en anglais (EVP) faites aux employés par les services RH des grandes entreprises concurrentes entre elles pour attirer et garder les meilleurs talents.

## 1.2 Un enjeu concurrentiel

Il s'agit pour les professionnels de l'immobilier de proposer des bâtiments performants et satisfaisants à l'usage de leurs occupants.

**Quels sont ces critères d'attractivité pour les occupants et propriétaires, et en quoi valorisent-ils les actifs immobiliers des bâtiments de bureaux ?**

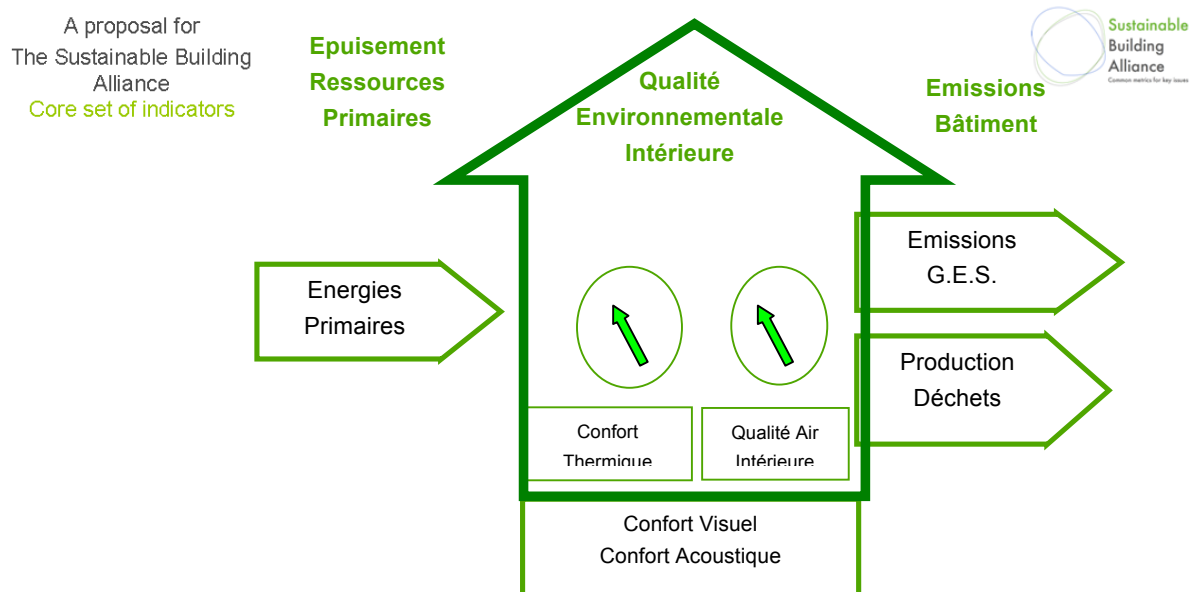
Quand on inscrit ces critères à l'échelle des décennies durant lesquelles ces structures immobilières vont exister, les aspects les plus superficiels s'effacent au profit de ceux plus tangibles et durables d'un produit commercial d'ampleur.



Dans ces critères, le confort n'est plus une notion abstraite, mais le facteur clef de la productivité de ces sites de production intellectuelle.

Cette attractivité doit se décliner depuis l'utilisateur jusqu'au promoteur du programme.

De plus, l'importance croissante que prend la certification environnementale dans la valorisation d'un immeuble, renforce l'importance de la qualité de l'ambiance intérieure, dans la mesure où les différents systèmes de certification en place dans le monde convergent pour prendre en compte les indicateurs du niveau de qualité de l'air intérieur, de confort thermique, de confort visuel et de qualité acoustique, dans l'évaluation de la performance environnementale (cf travaux [SB Alliance](#))



### Valeur verte ?

De fait, la notion de « valeur verte » est émergente.

Un immeuble qui assure, de concert, performance énergétique et performance des personnes dispose d'une garantie sur le risque d'obsolescence et sur des contraintes économiques liées à l'énergie (taxes carbone, prix de l'énergie).

Constatée aux Etats-Unis pour des immeubles certifiés LEED ou Energy Star à travers plusieurs études, (sur un parc de plusieurs centaines d'immeubles), la valorisation des performances énergie/confort/environnement fait l'objet d'analyses sur le marché européen (cf en ce sens Etude de Jean Carassus pour CSTB/CERTIVEA « les immeubles de bureaux verts tiennent-ils leurs promesses ? » Mars 2011). [Annexe 6.9](#).

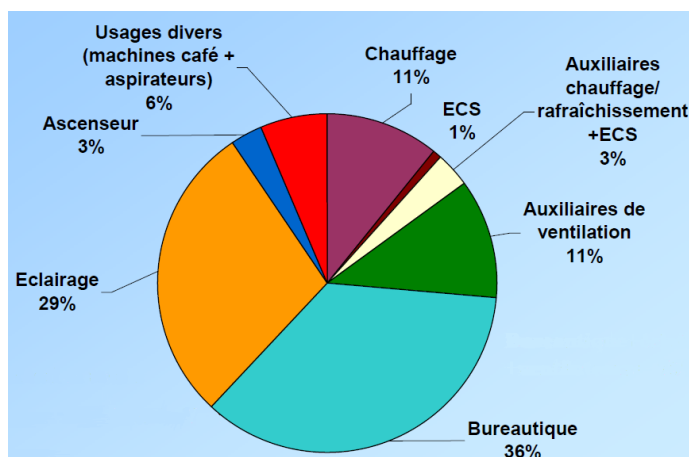
On peut légitimement penser que cette « valeur verte » sera d'autant plus rapidement établie et renforcée que les performances seront réelles (et non conventionnelles) et basées sur des critères précis.

### 1.3 Une nouvelle répartition des consommations énergétiques à maîtriser

**Les postes éclairage artificiel, informatique et ventilation deviennent prépondérants**

Avec l'amélioration continue de l'enveloppe (nouveaux matériaux, isolation renforcée, vitrages performants, ...) et la prise en compte du bioclimatisme en phase amont de la conception du bâtiment (gestion optimale des apports solaires passifs), **les besoins en chauffage et climatisation tendent à se réduire pour ne représenter qu'une part minime des consommations** (dans l'exemple ci contre, 11% pour le poste chauffage contre parfois plus de 50% dans un bâtiment déperditif).

Les postes éclairage artificiel, informatique et ventilation deviennent alors prépondérants, et **peuvent représenter plus de 75% des consommations totales**. Dans les bâtiments performants, les appareils mis en œuvre pour ces postes sont souvent à faible consommation d'énergie mais leur multiplicité et pour certains leur mode de régulation en font des postes de consommation importants. En effet les éléments de bureautique et les systèmes de CVC et d'éclairage artificiel ont souvent des fonctionnements continus et sont régulés sur tout ou partie du bâtiment alors qu'un zonage fin permettrait des économies notables.



Répartition des différents postes de consommations énergétiques - Bâtiment de bureaux BEPOS (consommation totale tous usages : 26.4kWhélec/m²/an), ZAC Bouchayer Viallet, Grenoble - Architecte : T.Roche - Source : Enertech.

**Plus la consommation théorique du bâtiment à la conception sera faible, plus l'impact du comportement des occupants sur la consommation réelle totale sera fort.**

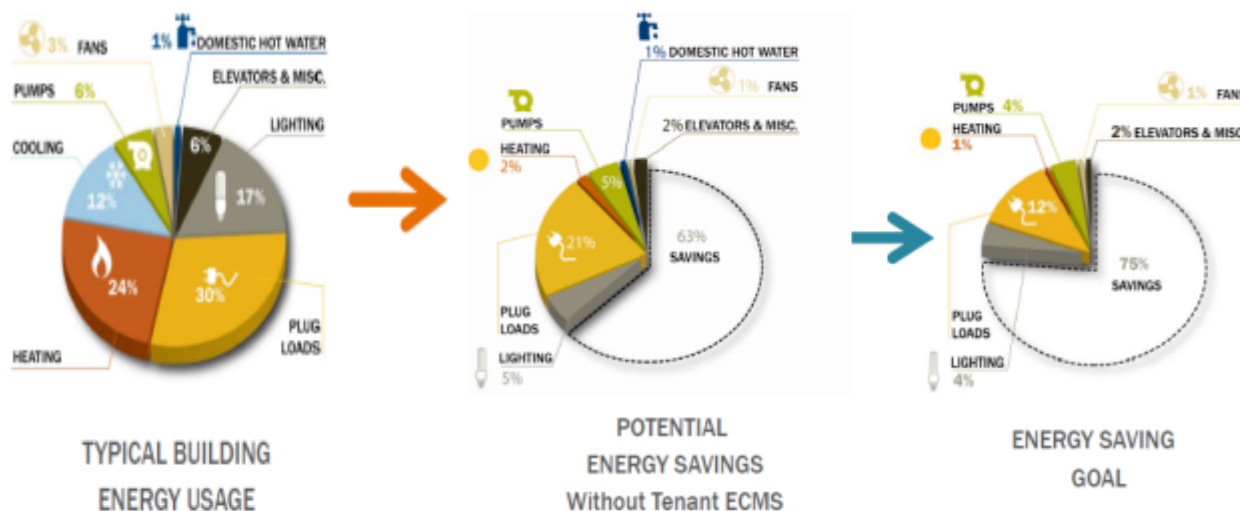
On trouve également dans les immeubles de bureaux, de nombreux équipements dont la consommation n'est pas négligeable : machines à café, boissons, friandises et fontaines à eau.

A titre d'exemple, on peut citer le cas des machines à boissons réfrigérées qui consomment sur une année presque autant que 10 ordinateurs.

La tendance des années à venir, impulsée par la Directive Européenne sur la performance énergétique des bâtiments, vers la construction dès 2020 de bâtiments « near zero energy » accroît encore l'importance des enjeux. En effet, plus la consommation théorique du bâtiment à la conception sera faible, plus l'impact du comportement des occupants sur la consommation réelle totale sera fort, aussi bien par l'utilisation qu'ils font du bâtiment que par les consommateurs qu'ils ajoutent pour leur activité (ordinateurs, serveurs informatiques, copieurs, imprimantes, machines à boisson.)

Selon les calculs réalisés par l'OSC (Oregon Sustainability Center), **dans un bâtiment « net zero energy », les occupants auront le contrôle direct d'au moins 30% de la consommation totale ;**

leur participation active sera indispensable pour atteindre et maintenir le « net zero energy » réel durant toute la vie du bâtiment (référence : Oregon Sustainability Center : projet bâtiment à Energie Zéro à Portland aux USA)



Etude de PAE consulting engineer pour le projet bâtiment 0 énergie « Oregon Sustainability Center » à Portland USA

L'importance croissante des enjeux économiques et environnementaux décrits ci-dessus modifie ces modèles économiques en y ajoutant l'aspect humain, et rend donc indispensable une approche plus scientifique et complète du sujet afin de dégager les recommandations les plus pertinentes.

Citons par exemple, les travaux de « Usable Building Trust » au Royaume Uni qui concluent sur des recommandations, décrits en annexe de ce document, de conception pour des bureaux plus performants.

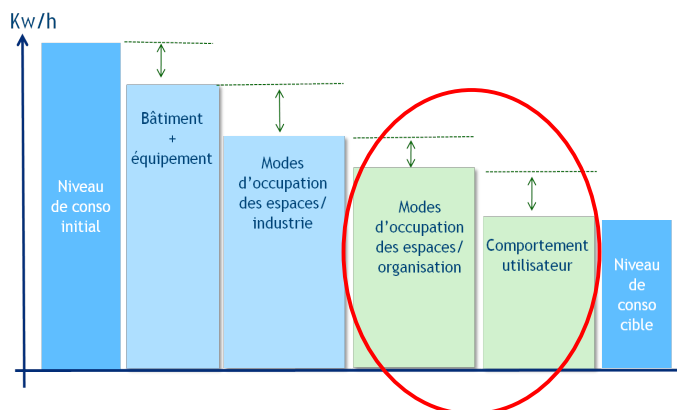
### 1.4 Intégrer les usages et les utilisateurs

On vient de le voir, la performance énergétique d'un bâtiment ne résulte donc pas uniquement de l'optimisation des solutions architecturales et techniques. Elle résulte aussi d'une bonne gestion et anticipation des usages qui y prévaudront (durée de travail, intensité énergétique liée aux équipements bureautiques, partition de l'espace etc..) ainsi que de l'adéquation des comportements des utilisateurs.

**La performance énergétique d'un bâtiment résulte aussi d'une bonne gestion et anticipation des usages.**

Or le comportement de l'utilisateur sera d'autant plus vertueux énergétiquement parlant, qu'il pourra agir à son niveau sur les paramètres du confort.

**Une nouvelle approche consiste donc à comprendre la capacité des occupants d'un bureau à accepter les systèmes mis en place pour contribuer à leur confort ; en d'autres termes, à passer d'une performance passive à une performance active.**





L'enjeu est de réaliser la bonne adéquation entre les automatismes de régulation nécessaires au maintien dans le temps de la performance énergétique, les informations du bâtiment et leur mode de diffusion vers l'utilisateur avec les actions possibles de celui-ci pour agir sur les paramètres de son confort.

Il s'agit aussi d'anticiper les nouveaux modes de travail qui incontestablement sont en train de muter profondément pour se focaliser sur des modes de travail collaboratif induisant une nouvelle répartition entre espaces individuels et espaces collectifs. Par exemple des utilisateurs plus mobiles dans les bâtiments passeront moins de temps à leur poste et vont donc avoir une perception différente du confort thermique, acoustique et visuel.

## 2 Définition du confort

### 2.1 Les trois niveaux de confort

**Le confort s'exprime avant tout par l'absence de confort.**

Dans la réalité de tous les jours, le confort s'exprime avant tout par l'absence de confort ou une limitation des inconforts. On le mesure aujourd'hui par le nombre d'utilisateurs insatisfaits.

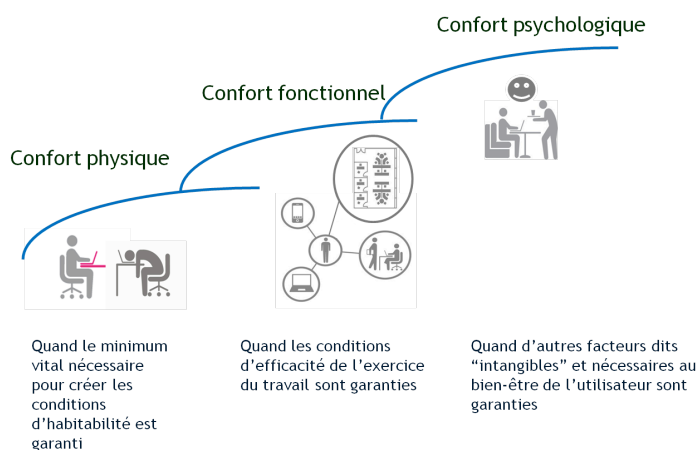
Jusqu'à aujourd'hui, le cadre normatif sur lequel se base l'ensemble des acteurs impliqués dans la construction du bâtiment s'attachait à garantir.

- Le confort visuel
- Le confort thermique
- La qualité de l'air intérieur
- Le confort acoustique.

Ces catégories que l'on nommera « traditionnelles » pour faciliter la compréhension, sont pertinentes mais ne sont pas suffisamment appréhendées du point de la perception de l'utilisateur.

C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser **le modèle du confort développé par Jacqueline Vischer**, psychologue environnementaliste et professeur de design reconnue pour ses recherches dans le domaine des espaces de travail.

Mme Vischer **définit le confort comme la résultante de trois niveaux hiérarchisés par ordre de priorité: le confort physique, le confort fonctionnel et le confort psychologique.**



[Vischer et al., 2004]

Son propos est de dire que ce n'est pas tant l'optimisation de chacune des composantes du confort qui permettra de générer un niveau de performance optimale mais bien la compréhension des interrelations entre chacune.

Selon le modèle de Jacqueline Visher :

- **Le confort physique est le minimum vital nécessaire pour créer les conditions d'habitabilité.**

Il s'agit ici de se conformer aux normes. Entrent dans cette catégorie :

- les aspects de santé, hygiène, et sécurité telles que définies par les normes et législation en vigueur
- La qualité physiologique de l'ambiance (Température/Hygrométrie)
- La qualité de l'air intérieur (olfactive, sanitaire, mouvement d'air)
- Le confort acoustique

- **Le confort fonctionnel ou confort de travail décrit les conditions d'efficacité de l'exercice du travail dans un bureau comme**

- La qualité de l'éclairage (naturel et artificiel)
- L'ergonomie des postes de travail
- La disponibilité et l'accessibilité aux outils et équipement en salles de réunion, cafétérias, espace reprographiques, etc...)
- L'adéquation de l'aménagement aux modes de travail d'une organisation

- **Intervient enfin le confort psychologique, exprimé de façon plus intangibles et subjective mais tout aussi important à garantir puisqu'il comprend**

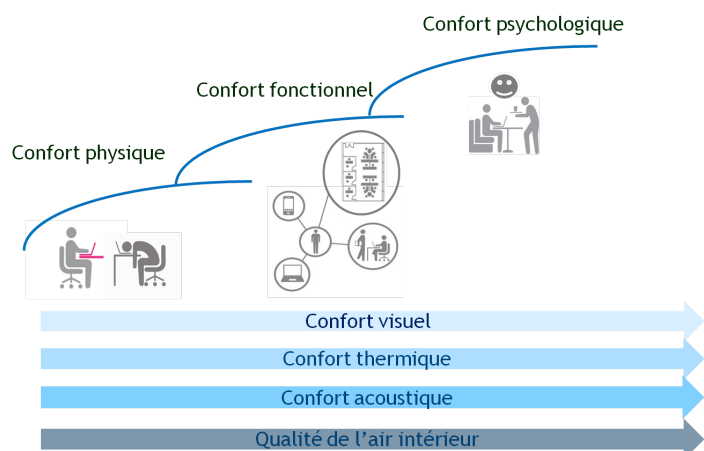
- Le sentiment d'intimité et de territorialité
- Le sentiment d'appartenance et de contribution à la réussite de l'entreprise
- La capacité à comprendre le fonctionnement de son espace
- la capacité à contrôler son espace de travail

=> d'où l'importance sur ce dernier point de faire bien comprendre aux utilisateurs les relations entre confort et consommation énergétique et leur donner les moyens d'information et d'action de sorte qu'ils deviennent éco-acteur de leur confort et de la performance énergétique.

### 2.1.1 La recommandation du GIE : traiter chaque paramètre du confort « traditionnel » à chaque niveau du modèle Visher

Classer l'éclairage dans le confort fonctionnel uniquement ou limiter la qualité de l'air au confort physique nous paraît inapproprié.

Il est par contre plus pertinent de tenter d'améliorer le confort thermique, visuel, acoustique, et la qualité de l'air en prenant en compte les trois niveaux de confort décrits par Visher.



## 2.1.2 Le confort fonctionnel

### 2.1.2.1 Créer les bonnes conditions d'efficacité de l'exercice du travail dans un bureau suppose de bien comprendre les modes de travail qui y prévalent

Or les modes de travail ont fortement évolué et peuvent se caractériser par ces trois idées fortes :

- ***Il est possible de travailler partout, tout le temps, et aussi en dehors du bureau***

**La traditionnelle répartition des m<sup>2</sup> qui a formaté les normes de confort, selon le ratio 80% de postes individuels, 20 % de salle de réunion, est caduque.**

Pour les employés « cols blancs » dont l'objectif principal est de produire des idées, plus besoin d'un équipement spécifique ou d'une contrainte horaire rigide. L'augmentation exponentielle des équipements électroniques (mobiles, PDA) permet d'être « connecté » partout, en permanence. En témoigne d'ailleurs, l'émergence d'un nouveau luxe : celui d'être capable de se « déconnecter ».

(source: Nomads At Last, Economist, 4.08).

- ***La collaboration devient le mode de travail prédominant***



Dans ce monde compétitif, la collaboration qui permet de partager de l'information et de générer de nouvelles idées est devenue un facteur clé du succès des entreprises. En effet, selon une étude de Jones Lang LaSalle (Workplace Strategy), **le travail individuel représentait 40% de tout le travail accompli en 2000, et seulement 20% en 2010**. De plus la collaboration dépasse les frontières de la seule entreprise pour devenir multipartenaires : 71% des chefs d'entreprises déclarent qu'ils pensent à des projets de collaboration multi-entreprises (source: IBM CEO Study the Enterprise of the Future).

- ***La population d'une entreprise est diverse et mobile***

La population des entreprises est plus diverse que jamais. On parle de diversité générationnelle, de diversité culturelle, et de diversité de nature de travail. Les « sédentaires » les « nomades » et les « toujours jamais là » ; selon qu'ils seront baby-boomers, générations X, Y ; vont avoir des attentes différentes à propos de leurs carrières, de l'équilibre vie privée, vie professionnelle, vis-à-vis de la technologie, des styles de travail et des équipements à prévoir dans l'espace de travail.

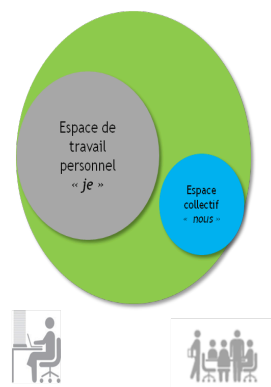
### 2.1.2.2 Les conséquences sur l'espace de travail et le confort

- **Concevoir pour une grande variété d'espaces à dominante collaborative**

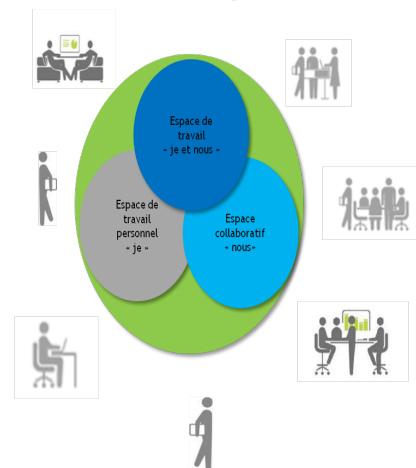
**Assurer les conditions d'efficacité de l'exercice du travail, nécessite de bien comprendre et anticiper les modes de travail des utilisateurs.**

Les bureaux d'aujourd'hui sont composés d'une variété d'espaces, aptes à accueillir plusieurs modes de travail différents, et faciliter le travail en groupe: les collaborateurs travaillent de plus en plus fréquemment à deux, en petit groupe, en grand groupe, en face à face ou par visio et télé présence, et ce de façon planifiée ou spontanée.

#### Vision traditionnelle



#### Vision émergente



C'est dès la phase de conception qu'il faut penser à créer des espaces spécifiques dédiés aux travaux de groupe (tels que séance de créativité, groupe projet ou plateforme métier, etc...), en même temps qu'il faut préserver des aménagements adaptés au travail individuel, ainsi que des zones de repli accessibles à chacun, pour les circonstances nécessitant confidentialité ou concentration intense.

- **Donner à l'utilisateur un moyen de contrôler les paramètres de son confort en fonction des espaces qu'il occupe**

**Le bâtiment doit donc porter en lui le potentiel d'adaptabilité dynamique à ces changements d'usages**

Les enquêtes de satisfaction et de perception du confort montrent que les occupants font une distinction entre le confort individuel à leur poste, le confort dans les espaces collectifs de collaboration et enfin, le confort global lié à l'intelligence de l'aménagement de l'espace par rapport à leurs modes de travail

De plus il est aisé de comprendre qu'une consigne de température à 19°C sera mieux tolérée par un employé nomade qui passera 1 heure dans une salle de réunion que par une personne sédentaire et à son poste 8 heures par jour.

Dans la mesure où il est très rare de savoir à priori qui occupera les locaux et quels seront les usages de l'espace, **le bâtiment doit donc porter en lui le potentiel d'adaptabilité dynamique à ces usages** dans la distribution des utilités (éclairages, alimentations, équipements climatiques, les réseaux informatiques etc.). Le cloisonnement ou décroisonnement doit être une action aisée et rapide. Les automatismes devront suivre automatiquement ces réaménagements sans intervention directe.

### 2.1.3 Le confort psychologique

Le confort psychologique que va ressentir un employé découlera très largement de la culture de l'employeur, de ses modes de décision et de ses modes de management.

L'espace de travail jouera également un rôle prépondérant en ce sens qu'il traduit les partis pris d'une organisation et qu'il peut induire des comportements.

**L'espace doit s'adapter aux individus et aux activités exercées, et non l'inverse**

La façon dont l'espace de travail est aménagé va influencer

- Le sentiment d'intimité et de territorialité
- La capacité à comprendre le fonctionnement de son espace
- la capacité à contrôler son espace de travail

**Donner le contrôle à l'utilisateur tout en maîtrisant la consommation énergétique.**

C'est l'enjeu des systèmes de gestion des bâtiments qui doivent trouver la bonne adéquation alliant confort automatique, maîtrise des consommations, véhicule d'informations et prise en compte des besoins de chaque personnalité dans un contexte en constante évolution.

**Accompagner le changement**

Ce livre blanc se voulant un guide de recommandations à l'usage des programmeurs et équipementiers, nous avons donc surtout focalisé nos recherches sur les paramètres physiques et fonctionnels du confort, et particulièrement analysé les interactions entre paramètres du confort physique et performance énergétique.

Maintenant, pour garantir ce confort psychologique, il nous paraît indispensable de recommander que tout projet immobilier accorde un poids stratégique aux concepts d'aménagement de l'espace tout autant qu'à l'accompagnement au changement inhérent à tout processus de déménagement.

Les recommandations sur les matériels informatiques, les types d'accès au bâtiment, les offres de parking, de mobilité, les aspects de sécurité, la présence d'une restauration et autres services, la qualité de la prestation de Facility management, ainsi que organisation et le management des entreprises occupantes ne seront pas abordés. Ces points sont hors du champ d'action direct des professionnels de l'immobilier.

## 2.2 Le confort des espaces de travail

**Il y a plus de critères qui concourent à concevoir des espaces de travail sains et performant que juste les critères d'intégrité physiques.**

Un poste de travail ergonomique est une nécessité bien connue et établie. Tout le monde s'accorde à reconnaître qu'un bon siège de travail, une bonne posture et un support clavier sont nécessaires pour éviter les problèmes de dos et les syndromes du tunnel carpien car la douleur physique entrave la performance des employés.

Mais on voit bien qu'il faut dépasser les critères d'intégrité physiques car l'espace de travail dans sa globalité est le lieu où vont se créer les conditions du confort ou de l'inconfort. La qualité de son aménagement aura donc un impact direct sur la perception de confort, tant individuel que collectif, aux trois niveaux : physique, fonctionnel et psychologique.

Les paramètres clés à prendre en compte vont concerner notamment les ratios d'allocation des surfaces, la facilité d'accès aux différentes zones, la pertinence de leur agencement, leur agrément, et leur adéquation aux activités exercées.

**Le meilleur résultat est obtenu par une étude ad hoc capable d'intégrer en amont la stratégie et la culture de l'entreprise.**

Une clé essentielle de la réussite d'un environnement de travail confortable et efficace est la compréhension des différentes situations rencontrées dans une journée de travail. Il est également crucial de prendre en compte la nature du travail, c'est-à-dire la spécificité des métiers et des secteurs d'activités concernés.

Soutenus par des technologies fixes ou équipés de technologie mobile (PC, tablette, smart phone, etc...), en équipe ou individuellement, **les collaborateurs devront pouvoir choisir l'environnement le mieux adapté à la circonstance de travail requise.**

Ce qui implique d'aménager les bureaux en ménageant des espaces fermés de différentes tailles, des espaces ouverts ou semi-ouverts, des salles de différentes capacités, des points de rencontre et de détente.

#### **Les grands principes d'aménagement à suivre deviennent donc :**

- Accueillir différents modes de travail
- Favoriser la créativité par des types d'espaces différents
- Faciliter l'accès à l'information papier et digitale
- Concilier communication et besoins de confidentialité
- Favoriser la mobilité et le changement de postures
- Proposer plusieurs types d'équipements au choix des utilisateurs
- Utiliser l'espace, la signalétique pour marquer les territoires, communiquer la marque, la culture et les valeurs de l'entreprise

#### **Cadre pour comprendre l'importance de bien concevoir un espace de travail**

Plusieurs théories, méthodes et outils ont été développés pour collecter l'information nécessaire pour concevoir des bureaux adaptés aux activités qui vont s'y dérouler.

Une de ces approches s'appelle Applied Research and Consulting (ARC) ou Recherche Appliquée et Conseil en français. Son parti pris est de placer l'utilisateur au centre d'une démarche participative d'élaboration des solutions, dans le respect des stratégies de l'entreprise. A ce titre l'accompagnement du changement est une composante dominante des missions menées.

ARC est une méthode qui met en œuvre un processus en trois étapes qui consiste à questionner, observer et faire expérimenter. Les utilisateurs sont invités à découvrir et participer au processus créatif de conception de leur espace ce qui leur permet de considérer leur futur espace de travail comme un outil de changement organisationnel.

- Questionner :  
Identifier les besoins par de la collecte de données (questionnaires, études organigrammes, enquêtes satisfaction)
- Observer :  
Conduites par les employés eux même dans leurs locaux, il s'agit de leur faire prendre conscience des activités réellement menées et du contexte actuel.
- Expérimenter :  
Organiser des ateliers participatifs où le personnel et l'encadrement construisent des modèles physiques de solutions pour visualiser les opportunités de changement et concrétiser les idées pour faciliter les discussions.

Le résultat attendu est de rendre explicite les modes de travail, de révéler comment l'organisation se comporte et comment elle crée de la valeur. Les participants identifient à la fois comment ils travaillent et où résident les dysfonctionnements. Ils définissent ensuite les solutions potentielles qu'elles soient d'ordre organisationnel, culturel ou qu'elles portent sur de nouvelles idées d'aménagement et de solutions technologiques. Le bénéfice de ce processus est qu'il améliore les relations interpersonnelles entre les différents départements, qu'il permet de définir les compromis financier à réaliser, et qu'il intègre les futurs utilisateurs dans un processus de changement augmentant les chances d'adoption des futurs espaces.

## 2.3 Confort Thermique

Le confort thermique ne se résume pas à la seule mesure de la température de l'air mais est une notion subjective régie par quatre paramètres d'ambiance (température d'air, température moyenne radiative, vitesse relative de l'air associée à son degré de turbulence, humidité relative) et deux paramètres propres à l'occupant (son métabolisme dit « activité », et son isolement thermique vestimentaire dit « vêtire »).

Ce dernier point, qui paraît découler du bon sens pour la majorité, n'est pourtant pas toujours mis en application, parce que parfois difficilement conciliable avec le monde professionnel de nos modes de vie modernes ; avant d'enclencher la climatisation, il suffit parfois de se dévêtir un peu pour retrouver un niveau de confort satisfaisant.

La surchauffe des bâtiments tertiaires nous paraît un problème crucial à traiter tant en été qu'en hiver car il est fréquent d'ailleurs dans certains immeubles tertiaires actuels de grand volume d'avoir une simultanéité des besoins : alors que les bureaux situés en façade Nord ont besoin de chauffer, les bureaux exposés aux rayons du soleil peuvent au même moment avoir besoin de rafraîchir.

La conception architecturale des bâtiments performants (de type bioclimatique c'est à dire intégrant son orientation au soleil et l'environnement proche du bâtiment tel que le vent, les masques, la végétation ...) devrait limiter ce phénomène.

Des automatismes qui calculent à la fois la position du soleil, son intensité, le besoin en lumière naturelle et l'apport thermique résultant pour ajuster les protections solaires.

*Les Annexes 6.1 et 6.2* donnent les aspects scientifiques du confort Thermique vus par le Laboratoire Energétique de Bâtiment du C.E.A. au travers de sa contribution aux travaux du programme Homes et aux études menées pour le compte du GIE EEP.

## 2.4 Qualité de l'air intérieur

Avec la qualité sanitaire de la nourriture, des boissons, la qualité de l'air que nous respirons contribue à créer un environnement sain et se place avant le confort sur le plan de la santé.

La qualité sanitaire de l'air résulte de trois facteurs : biologique, chimique et particulaire.

Compte tenu que le périmètre de notre étude se concentre sur les bâtiments de bureaux en milieu urbain, nous n'aborderons pas le facteur biologique.

Les sources de pollution des deux autres facteurs sont l'air extérieur qu'on apporte à l'intérieur volontairement par les moyens mécanique ou par les ouvrants de façade, par les personnes présentes et par les éléments mobiliers et immobiliers des bureaux.

Améliorer la performance énergétique des bâtiments ne doit pas s'opposer à la qualité de l'air intérieur, il existe des systèmes permettant d'optimiser ces deux objectifs sans les opposer.

*L'Annexe 6.3* décrit l'ensemble des critères scientifiques et techniques nécessaires à la compréhension de ce qu'est la Qualité de l'Air Intérieure.

## 2.5 Confort visuel

Le confort visuel ne se réduit pas à une intensité lumineuse. Ce critère essentiel du confort repose sur un grand nombre de paramètres physiques. Améliorer ce critère tout en limitant la consommation électrique, nécessite sa prise en compte dès la conception du bâtiment, pour permettre à chacun un plus grand accès à la lumière naturelle et des sources de lumière artificielle de qualité s'adaptant automatiquement à l'usage et aux conditions extérieures.

Pour prendre en compte les besoins particuliers, il faut bien comprendre ce que recouvrent ces notions d'éclairage, température de lumière etc...La fiche Eclairage et l'étude menée par l'ENTPE de Lyon en [annexes 6.4 & 6.5](#) éclairent sur ces paramètres.

## 2.6 Confort acoustique

Le bruit est une source importante d'inconfort et de perturbation intellectuelle, la capacité de concentration d'un collaborateur est profondément liée à ce critère. Contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, le confort acoustique ne se réduit pas au silence, mais aux perturbations dans l'environnement sonore.

De fait, plus un espace est silencieux et plus les épiphénomènes sont pénibles et malheureusement inévitables dans un espace de travail (téléphone, objets, conversations).

Il faudra donc plutôt se concentrer sur la propagation de bruits furtifs et créer une ambiance sonore qui laisse cours à une vie professionnelle collaborative tout en permettant à chacun un espace de concentration.

Deux critères sont donc à prendre en compte, le niveau sonore d'ambiance et le coefficient d'absorption des espaces de travail.

A proprement parlé, l'acoustique n'a pas d'impact direct sur les consommations énergétiques dans le bâtiment. Le lien entre acoustique et énergie est indirect et est souvent rattaché aux systèmes de chauffage, ventilation, climatisation (CVC) et à la ventilation naturelle, destinés à améliorer le confort global de l'occupant.

[Annexe 6.6](#) : Confort Acoustique



## 3 Confort et optimisation énergétique

Allier confort, productivité et économie d'énergie est une problématique faite d'équilibres et de compromis.

Pour bien comprendre ce que recouvrent les termes confort et leurs interactions avec la performance énergétique sous l'angle scientifique, se trouvent en Annexes 1 les résultats des travaux menés par l'INES sous mission du GIE Enjeu Energie Positive, du programme HOMES et l'étude de L'ENTPE de Lyon.

Ci-dessous une synthèse des points marquants.

### 3.1 Couplage confort thermique et besoins énergétiques

Du fait de la diminution importante des consommations liées aux postes traditionnels du chauffage de la climatisation et de l'éclairage, ce qui semblait négligeable devient prépondérant avec en particulier l'impact énergétique des actions utilisateurs sur leur environnement de travail.

**C'est essentiellement en jouant sur la température de consigne qu'on peut influencer à la fois le confort thermique et la consommation énergétique.**

Il a par exemple été démontré qu'augmenter la température du chauffage de 2°C engendre dans un bâtiment BBC 33% des besoins de chauffage en plus alors que dans les bâtiments plus anciens cela ne représentait que 22,7%.

On comprend dès lors que chaque action devra être contrôlée, mesurée et encadrée pour d'abord maintenir les objectifs énergétiques et ensuite en sensibilisant les utilisateurs, améliorer la performance globale.

Une régulation intelligente du bien-être thermique des occupants, couplée à l'énergétique du bâtiment n'est pas uniquement basée sur la température d'air mais sur l'ensemble des six paramètres précédemment évoqués

### 3.2 Couplage Qualité de l'Air Intérieur (QAI) et besoins énergétiques

**Un bon air intérieur repose dans un premier temps sur le contrôle des sources polluantes**

Il s'agit d'éviter d'ajouter des charges polluantes en limitant au maximum voire en éliminant tous **risques d'émissions de polluants chimiques, physiques, ou biologiques** dues à notre mode de vie, aux matériaux de construction et décoration, aux mobiliers... Malheureusement, si l'on se place du point de vue des émissions liées au mobilier et aux matériaux de construction, de faibles émissivités de polluants s'accordent souvent avec des coûts élevés de la matière première utilisée lors de la conception de ces derniers. De plus, la caractérisation des émissions inhérentes aux matériaux, mobiliers et produits chimiques, se développe peu à peu sans pour autant être exhaustive (ex. : FDES [2], REACH, M1 Emission class for building material, Green Guard, ...).

---

2 FDES : Fiches de déclarations environnementales sanitaires : source FDES.fr

### **Un bon air intérieur repose dans un deuxième temps sur un bon renouvellement de l'air**

Pour les bâtiments tertiaires, la législation préconise un **système de ventilation mécanique** assurant un taux de renouvellement d'air (TRA) réglementaire. Cette technique est efficace si le système est correctement dimensionné au besoin réel du local considéré

De plus en plus de projets immobiliers font appel à la **ventilation naturelle** pour des raisons énergétiques en jouant sur la différence entre les températures diurnes et nocturnes. Il s'agit en premier lieu d'abaisser la température de la masse d'air présente dans les locaux qui aura d'autant plus de mal à diminuer que le bâtiment est très bien isolé thermiquement. L'air qui chauffe pendant la journée grâce aux apports internes et externes, une fois évacué au profit d'un air plus frais, ne sera pas à refroidir la journée suivante.

En second lieu, il s'agit d'utiliser l'inertie thermique des parois en béton en véhiculant un air dont la température est inférieure à la température de surface qui évacuera les calories piégées dans la masse du béton.

Cette technique appelée rafraîchissement nocturne ou « night purge » doit être pilotée très finement avec beaucoup d'anticipation pour ne pas créer de désagrément, d'inconfort et bien sur une surconsommation énergétique liée à des automatismes trop sommaires.

A noter : ce système n'est généralement pas capable d'intégrer une fonction épuration d'air (même pas de filtre mécaniques) du fait de son manque de réserve de pression disponible, ainsi l'air extérieur entre sans traitement à l'intérieur. Dans les milieux très urbanisés cette solution n'est pas forcément acceptable.

## **3.3 Couplage confort visuel et besoins énergétiques**

### **Prendre en compte les paramètres quantitatifs et qualitatifs du confort visuel**

Le confort visuel ne s'apparente pas uniquement à un niveau d'éclairage au niveau quantitatif: de nombreux paramètres qualitatifs tels que la distribution des luminances, les contrastes, l'accès à la lumière naturelle, les éblouissements ... interviennent dans cette notion.

### **Doser éclairage naturel et artificiel à bon escient**

La recherche de l'éclairage naturel optimal permet d'associer un bon confort visuel et une diminution des consommations liées à l'éclairage artificiel, ce dernier point étant essentiel à prendre en compte dans la conception des bâtiments tertiaires.

Le dimensionnement des ouvertures et de leurs protections solaires associées, spécifiquement à chaque projet permettra d'offrir un bon accès à la lumière naturelle et un bon niveau d'éclairage dans les bureaux. L'éblouissement des espaces du travail du fait de façades vitrées recevant trop de lumière est une gêne souvent constatée dans les opérations HQE. Une bonne conception architecturale devra prévoir des masques fixes pour éviter aux utilisateurs de baisser les stores puis d'allumer l'éclairage artificiel.

Le recours à celui-ci étant cependant inhérent à tout bâtiment, une installation performante de type luminaires fluorescents T5 longue durée de vie & ballast électronique haut rendement, lampes fluocompactes, technologies à LED, et dans un futur proche les innovants systèmes à OLED ; commandée par un système de gestion intelligente (détecteurs de présences/ sondes d'éclairage/ minuterie ...) permettra de limiter les consommations liées à l'éclairage artificiel.

Malgré des consommations d'éclairage mesurées relativement faibles, la première année d'exploitation du bâtiment met en avant **l'importance du paramétrage des dispositifs de contrôle et le gisement d'énergie important (jusqu'à 35%) lié à son optimisation.**

## 3.4 Couplage confort acoustique et besoins énergétiques

### Un lien indirect

A proprement parler, l'acoustique n'a pas d'impact direct sur les consommations énergétiques dans le bâtiment. Le lien entre acoustique et énergie est indirect mais peut être établi dans le cas de systèmes CVC mal dimensionnées ou mal installées. De même, l'ouverture des fenêtres ou la ventilation naturelle peuvent favoriser la transmission de bruits extérieurs vers l'intérieur.

Notons que d'autres sources de bruit sont à l'origine d'inconforts acoustiques comme les bruits de choc, les bruits des équipements individuels, les types de bureaux (bureaux seuls, ou openspace), les bruits extérieurs comme les transports routiers ou aériens... Aucun lien direct n'a été mis en évidence entre ces nuisances et l'efficacité énergétique du bâtiment. Cependant on peut imaginer qu'en cas de gêne dû à un bruit extérieur, l'utilisateur favorise l'utilisation de la climatisation plutôt que l'ouverture des fenêtres.

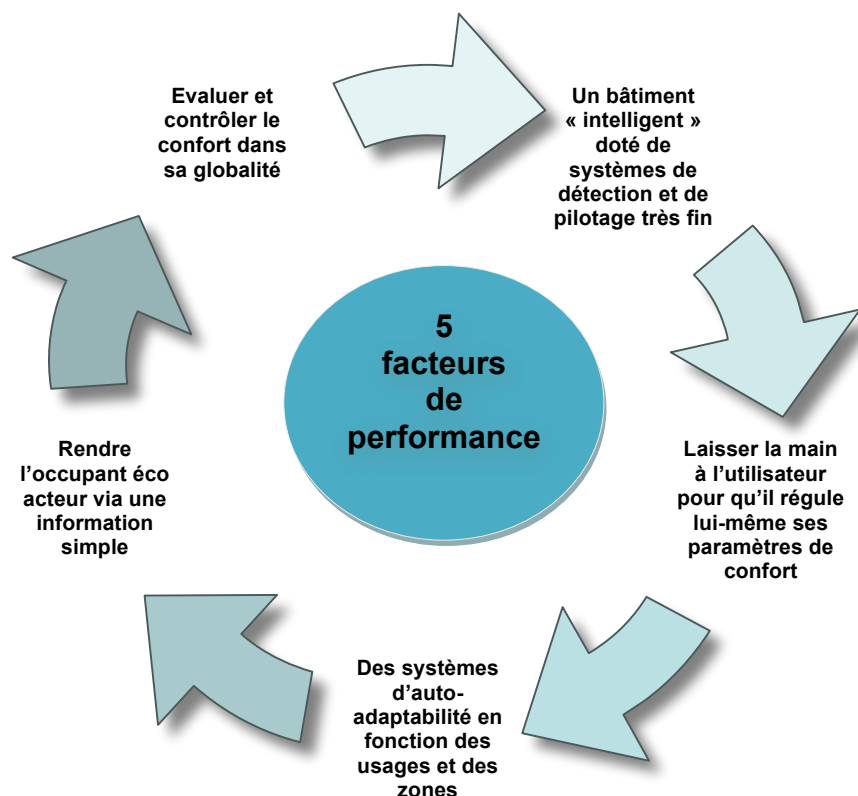
### Systemes CVC, ventilateurs d'appoint

Assurer confort thermique, qualité de l'air et niveau sonore acceptable, nécessite une conception avancée, une mise en œuvre soignée, un bon pilotage et une maintenance régulière des systèmes.

Il semble qu'un niveau sonore plus élevé, généré par les équipements, est mieux accepté par les occupants lorsque ces derniers gardent le contrôle dessus : +5 à +10dB(A) **dans le cas d'un climatiseur** - Norme NF EN 15251.

## 4 Recommandations & Perspectives

### 4.1 Les 5 facteurs de performance



**1. Un bâtiment intelligent** doté de système de détection et de pilotage très fin (fonction présence, mobilité, conditions météo etc.).

**2. Laisser la main à l'utilisateur** pour qu'il régule lui-même ses paramètres de confort dans la mesure où on a constaté qu'en général cela augmente la tolérance de l'utilisateur aux inconforts légers. Il faut privilégier l'accès facile à ces équipements, un retour d'information immédiat et une réaction rapide etc....tout en maîtrisant les plages de variation possibles en fonction des conditions d'environnement.

**3.** Compléter le dispositif par la mise en place de **systèmes d'auto-adaptabilité** : en effet l'être humain « oublie » le plus souvent de remonter la température, de fermer la lumière, d'ouvrir les stores en quittant un espace.

**4. Impliquer l'occupant** en lui donnant une information simple et factuelle sur ses conditions de confort et leur poids énergétique et en déployant des techniques d'accompagnement au changement. A partir des limites constatées des technologies actuelles, des travaux de recherches en cours et des évolutions des technologies, le groupe a dégagé des pistes d'innovations, certaines étant abordées plus précisément par le GIE dans les groupes « convergence des réseaux » et « éclairage ». Un des axes de ces innovations est la recherche d'une individualisation plus poussée de la relation bureau/occupant, par individu ou poste de travail via des solutions comme le Personal Office Energy Manager.

**5. Evaluer et contrôler le confort réellement perçu** par les occupants pour les différentes composantes du confort (thermique, visuel, acoustique, qualité d'air, fonctionnel et psychologique)

Il s'agit d'évaluer la performance globale du bâtiment en tant qu'outil de travail, en tant qu'objet technique, en tant que objet financier. Donc de prendre en compte l'avis des occupants en tant que personnes et en tant que société sur les critères de confort et de productivité

Des méthodes, outils et les résultats associés existent, connus sous le nom de « Post Occupancy Evaluation » ou « Facility Performance Evaluation »

**Ces conceptions sont réalisables avec les technologies disponibles.** L'expérience indique qu'elles sont justifiées économiquement lorsqu'on mesure la performance globale du bureau en exploitation. Mais pour apporter vraiment tous leurs bénéfices, ces recommandations doivent être indiquées dès les premières spécifications du programme immobilier. Leur application doit être vérifiée lors de la conception détaillée et jusqu'à leur mise en œuvre. Leur efficacité doit être ensuite mesurée en exploitation.

#### **Un lot GTB couvrant automatismes, capteurs et actionneurs**

Pour éviter un surcoût inutile, l'intelligence du bâtiment doit être pensée dans sa globalité et non comme la somme d'automatismes divers avec une interface d'utilisation. Il faut passer de la supervision contrôle/commande à la GTB de gestion énergétique. La conception d'un lot unique couvrant les équipements techniques, les automatismes et la gestion globale du bâtiment plutôt que de chaque lot séparément, permet une gestion énergétique globale et de réduire les coûts d'installation et surtout d'exploitation grâce :

- à la mutualisation des capteurs, appareils et du câblage en courant fort et courants faibles
- à une démultiplication des fonctionnalités grâce à une bonne cohérence des systèmes déployés plutôt qu'à une réduction des possibilités par manque d'homogénéité entre contrôleurs et régulateurs.

## **4.2 Eléments de programmation à respecter à partir de technologies déjà disponibles**

### **4.2.1 Espaces de travail**

Dans les espaces de travail (bureau fermé, espaces ouverts, salle de réunion)

- Donner la possibilité de réglage sur les paramètres de température et luminosité:
  - sur une surface la plus réduite possible compte tenu de l'usage de la zone, de l'aménagement et des équipements retenus, de la flexibilité souhaitée
  - à une tranche fixe autour de la consigne générale, elle-même réglable par l'exploitant, ou à un seuil déterminé de luminosité, lui-même réglable par l'exploitant
- Préférer la mise en marche manuelle demandant une action volontaire de l'occupant et l'extinction automatique par le système technique.
- Préférer les organes de commande d'usage intuitif et qui sont capables de donner à l'utilisateur un retour sur ses actions et qui soient multi fonctionnels en permettant à l'occupant de régler son environnement d'un seul endroit et d'un seul geste, positionnés à proximité des occupants, ceci quels que soient les changements d'aménagement, en utilisant judicieusement les technologies sans fils et sans piles ou la commande par interface sur PC en complément des technologies fixes

- Réguler la ventilation dans chaque zone en fonction du besoin et non des valeurs normées ; le taux de CO<sub>2</sub> donne l'exact besoin dans une salle de réunion ou alors le nombre de personnes effectivement présentes dans le bâtiment, mesuré par le système de contrôle d'accès si son zoning le permet
- Subordonner le fonctionnement des équipements techniques CVC du bâtiment aux horaires d'occupation, dans les espaces de travail à la réelle présence des personnes et la position des ouvrants.

## 4.2.2 Parties communes

Dans les parties communes (couloirs, parking, restaurant, hall d'entrée) et les locaux techniques (salles informatiques, stockage)

- Automatiser le fonctionnement du chauffage, ventilation sous le contrôle de l'exploitant et des spécialistes concernés de la société occupante
- Le meilleur compromis dans ces espaces est obtenu lorsque l'occupant n'a pas à se préoccuper des conditions de confort ni à intervenir sur le fonctionnement.

## 4.3 Voies d'amélioration

*Sont présentés ici différents moyens pour améliorer conjointement le confort des occupants et l'efficacité énergétique issus des études confiées à l'INES.*

### 4.3.1 Techniques dites actives

- Systèmes CVC

Il est important de garder à l'esprit qu'une approche systémique du confort nécessite de cibler les paramètres et indices les plus pertinents. Un des principaux actionneurs, sur lesquels les algorithmes de contrôle commande ou l'utilisateur peuvent impacter, est la ventilation couplée (ou pas) à un système de conditionnement d'air (ventilation généralisée pour l'ensemble du bâtiment/pièce ou personnalisée pour l'occupant).

Ce système peut être considéré comme l'articulation principale entre l'efficacité énergétique (EE), la qualité de l'air intérieur (QAI), le confort thermique (CT) et le confort acoustique (CA).

En effet, il impactera sur :

→ L'efficacité énergétique : en consommant plus ou moins d'énergie en fonction du débit de renouvellement d'air souhaité et/ou de la température de consigne fixée pour atteindre les objectifs de confort requis par ou pour l'occupant. La possibilité de moduler les débits de ventilation pour s'adapter aux besoins et de récupérer de l'énergie sur l'air extrait permettent aussi d'optimiser cette consommation d'énergie.

→ La QAI en traitant l'air extérieur avant son introduction dans le bâtiment et en diluant plus ou moins rapidement la charge polluante (humidité relative ou dioxyde de carbone dilués dans les bureaux et salles de réunion [indice de confinement dû à l'occupant]). La QAI est liée à de multiples sources (occupants, mobilier, matériaux de construction, etc.) ; On note également que l'air intérieur peut être plus chargé de certains polluants que l'air l'extérieur. L'introduction de

fonction d'épuration dans les unités de confort permet de traiter localement les pollutions d'origine intérieure, notamment celles de type particulaire.

→ Le confort thermique (ISO 7730) en générant, dans le cas d'un mauvais dimensionnement du système ou mauvais positionnement des bouches, etc., des inconforts locaux (courants d'air, mesurés par l'indice Draught Rate : DR) ou globaux (température d'air en sortie du système de ventilation : risques de sensation trop chaude ou trop froide pour le corps dans son ensemble).

→ Le confort acoustique : par des déclenchements intermittents du système de ventilation ou par des vitesses d'air trop importantes augmentant le niveau de bruit. Dans le cas d'une VMC, pour remédier à un bruit de fond de ventilateur, il est possible d'équiper les gaines d'un silencieux venant s'incorporer juste après le ventilateur (attention toutefois, ce système entraîne des pertes de charge non négligeable ...). Pour éviter le sifflement des bouches d'extraction, un réglage de l'installation, le changement des bouches ou leur maintenance (généralement un simple lavage) peut suffire à atténuer le problème.

- **Climatisation raisonnée**

Si les températures de confort ne peuvent être atteintes sans recours à un système rafraîchissement actif, il conviendra de prendre quelques précautions :

- choix d'une installation performante (ex. PAC avec un coefficient de performance élevé)
- conception et dimensionnement adéquats de l'installation (ballons de stockage, ...)
- dimensionnement approprié
- régulation efficace (température de consigne, GTB,...)

*Remarque : réduire la taille de l'installation de climatisation permet également de réduire significativement les coûts (Equipements eux-mêmes, réseaux de distribution, production calorifique et frigorifique etc.)*

- **Eclairage**

Les techniques actives les plus couramment mises en œuvre afin de réduire les consommations d'éclairage en offrant un niveau élevé de confort visuel, sont

- Installation de sources lumineuses performantes : ex. luminaires fluorescents T5 longue durée de vie & ballast électronique haut rendement
- Commande de l'installation par un système de gestion intelligent : ex. détecteurs de présences, gradation par sondes d'éclairage, différenciation des zones d'allumage (dissociation entre bureaux en premier jour et bureaux éloignés des sources de lumière naturelle), ...

Dans le but de réduire les consommations, et en complément de la mise en œuvre de systèmes performants gérés intelligemment, il est intéressant de réduire la puissance installée en maintenant un bon niveau de confort visuel.

Une solution consiste à l'installation d'éclairage qui visera le maintien d'un niveau d'éclairage global de l'ordre de 200Lux (niveau relativement bas) complété par un éclairage ponctuel (de type lampe de bureau) garantissant 400 à 500Lux sur le plan de travail uniquement à l'endroit nécessaire.

Cette solution offre un meilleur confort que les installations actuelles garantissant un éclairage artificiel générale de 500Lux (plaintes récurrentes d'occupants depuis plusieurs années vis-à-vis d'un niveau excessif d'éclairage artificiel). La médecine du travail préconise désormais un niveau d'éclairage de 220Lux pour le travail sur écran.

Par la mise en œuvre de cette solution, il est possible de réduire la puissance installée à moins de 10W/m<sup>2</sup> soit une réduction d'environ 50% par rapport aux installations moyennes actuelles.

### 4.3. 2 Techniques dites passives

Outre les techniques actives qui sont plus ou moins énergivores, des techniques passives existent. Ce sont des mesures architecturales et constructives qui permettent d'apporter une solution alternative au confort en consommant peu ou pas d'énergie (ex. : isolation par l'extérieur, stores, ventilation naturelle...).

- **Les gradients de température** (par exemple la sensation de « pieds froids ») entraînent le plus souvent une augmentation de la consigne de température par l'utilisateur = augmentation de la facture énergétique  
→ Solution : en premier lieu assurer une bonne isolation des dalles de sol en contact avec l'extérieur ; puis mettre en place un brassage d'air adapté, un système assurant l'homogénéité thermique ou un système actif ponctuel complémentaire.

- **Réduire les apports solaires**

La principale source de surchauffe étant le soleil et les bâtiments tertiaires ayant des surfaces vitrées très importantes, il est important de se protéger du rayonnement solaire direct. Il existe pour cela de nombreux dispositifs

- **Réduire les apports internes**

Les apports internes, notamment électriques, constituent la source principale d'apport d'énergie à l'intérieur des bâtiments de bureaux. Réduire ces apports (réduction des charges thermiques) présente le double avantage de diminuer leur consommation électrique propre et de réduire les consommations de climatisation tout en augmentant le confort.

Il faut noter toutefois qu'en période froide, les apports internes permettent de diminuer la consommation de chauffage.

De façon générale dans les bâtiments tertiaires performants (BBC, BEPOS) qui possède une enveloppe étanche et fortement isolée, on cherchera plutôt à diminuer les charges internes.

Il faut noter que l'éclairage constitue un apport de calories non négligeable dans les bâtiments tertiaires. L'optimisation des systèmes d'éclairage va donc entraîner une baisse conséquente des charges internes (systèmes plus performants dégageant moins de chaleur, régulation efficace, diminution du seuil d'éclairement global).

- **Apporter de l'inertie**

L'inertie, c'est-à-dire le stockage de calories ou de frigories dans un matériau « lourd », permet d'une part un déphasage du pic de température (par exemple entre le jour et la nuit) et d'autre part son amortissement. Mais pour bien gérer le besoin avec la ressource, les algorithmes de régulation doivent être conçus pour cela et avoir une forte capacité d'anticipation sous peine de dégrader la performance énergétique.

En particulier les planchers réversibles demandent une grande expertise de la GTB dans ce domaine pour assurer confort et pérennité de l'installation.

- **Brassage d'air**

De nombreux travaux portant sur le confort d'été montrent qu'il est tout à fait possible d'améliorer la sensation thermique des individus en période chaude, via des techniques simples allant du simple brassage d'air généralisé ou individuel, à des techniques de Personalized Ventilation (PV). Ces solutions permettent d'abaisser la sensation thermique des individus, et/ou d'apporter



de l'air « neuf » directement dans les voies respiratoires (améliorant la Qualité de l'Air Perçu (QAP), la performance, et réduisant le syndrome du bâtiment malsain \_SBS\_) [3 ,4].

Un tel procédé (PV) permet d'une part, d'améliorer le confort thermique et la QAP, et d'autre part l'énergie consommée grâce à la dilution de la pollution directement au niveau des voies respiratoires des individus [5].

L'intérêt d'une telle démarche réside dans l'augmentation de la température de consigne en période de climatisation : température intérieure dans le cas de la mise en œuvre d'un système passif - température de consigne du système de climatisation dans le cas d'un système actif. Cette dernière pouvant passer de 26°C à 28°C voire 30°C si l'occupant garde la main sur le brasseur d'air. Par conséquent, l'augmentation de la température de consigne favorise les gains énergétiques pour une classe de confort équivalente.

Les brasseurs d'air pourront être mis en place dans des bâtiments sans système actif de rafraîchissement, ou en complément du système de rafraîchissement existant.

Cependant, les courants d'air sont généralement plus mal perçus en hiver qu'en été et peuvent entraîner une augmentation de la consigne de chauffage

→ Solution : maîtriser les ouvertures et l'étanchéité de l'enveloppe, maîtrise des vitesses d'air des équipements mécaniques par l'occupant.

En raison de problèmes d'installation ou de dimensionnement (ex. déclenchement par intermittence, sifflement des bouches), les systèmes CVC peuvent être à l'origine d'une augmentation du niveau sonore dans les espaces intérieurs, pouvant générer un inconfort. Il faut également prêter attention à la transmission des bruits extérieurs en cas de ventilation naturelle...

→ Solution : dimensionnement adéquat, mise en œuvre soignée, régulation optimisée et maintenance régulière.

- **Eclairage naturel**

L'accès à la lumière naturelle de l'occupant dans son espace de travail, est un besoin fondamental pour assurer son bien-être, et impacte fortement sur ses activités. L'éclairage naturel est plus nuancé et variable qu'un éclairage artificiel même performant. Le caractère cyclique de l'éclairage naturel est bénéfique pour l'équilibre psychique de l'occupant, et indispensable pour une bonne perception de l'instant et du lieu dans lequel l'occupant évolue. Outre ce lien vers l'extérieur, les vitrages offrent également une vue lointaine nécessaire au repos de l'œil après une vision rapprochée.

La qualité spectrale de la lumière naturelle assure également la meilleure vision possible des objets et des couleurs. En effet, l'œil humain est naturellement adapté à la lumière naturelle (répartition spectrale identique à la courbe de sensibilité de l'œil). La lumière diurne constitue l'éclairage d'ambiance par excellence.

- **Dispositifs anidoliques et étagères à lumière**

Différents dispositifs, mis en œuvre en façade, permettent une amélioration significative des performances lumineuses dans l'ensemble d'une pièce (facteur de lumière du jour, autonomie en éclairage naturel, etc.) : ce sont des dispositifs anidoliques ou des étagères à lumière qui capte la lumière naturelle pour la diriger vers l'intérieure des locaux. Les stores à lamelles orientables peuvent également jouer ce rôle de capture de lumière, mais également de déflecteur des rayons lumineux vers le plafond pour éviter les éblouissements.

---

<sup>3</sup> Kaczmarczyk J., Melikov A., Sliva D., 2008 – "Avoiding draught discomfort with personalised ventilation used at the low range of comfortable room air temperature", Indoor Air 2008, Paper ID: 1035.

<sup>4</sup> Kaczmarczyk J., Melikov A., P.O Fanger, 2004 \_ "Human response to personalized ventilation and mixing ventilation", indoor air 2004; 14 (suppl 8): 17-29.

<sup>5</sup> Kaczmarczyk J., Melikov A., 2008 –"Impact of air movement on perceived air quality at different pollution level and temperature", Indoor Air 2008, Paper ID: 1033.

**Par contre on comprend bien que ce système doit interagir avec la régulation de la lumière artificielle, la régulation thermique et les besoins de l'occupant pour trouver le meilleur compromis entre confort visuel et performance thermique.**

## 4.4 Accompagnement au changement

Comme nous l'avons démontré au paragraphe 1.3, l'implication de l'utilisateur apporte deux avantages :

- Celui d'une acceptation par l'utilisateur d'une plage de confort plus souple qu'une personne non sensibilisée.
- Sa participation peut engendrer des économies d'énergie pouvant aller jusqu'à 25%.

Sensibiliser, informer, impliquer et rendre chaque personne éco-responsable nécessite un vrai plan de communication pour modifier les rapports entre utilisateurs et leur lieu de travail.

Considérer son « bureau » comme un espace qui peut améliorer ses conditions de travail et non plus comme une contrainte subie est un vrai changement, porteur d'un fort pouvoir d'appropriation de l'usager à son espace de travail et son entreprise.

Dans ce sens, les managers d'équipes, la direction d'entreprise, les ressources humaines ont un rôle primordial dans cet accompagnement au changement où tout le monde y trouve son compte, notre planète en plus.

La GTB du bâtiment va aussi contribuer à ce changement : c'est elle qui apporte « l'intelligence » en permettant au bâtiment de s'auto-adapter aux conditions extérieures - principalement météorologiques - et aux caractéristiques intérieures liées aux usages et aux modes de travail des entreprises locatrices. La GTB va également fournir les informations énergétiques, les rapports circonstanciés pour permettre un suivi des objectifs énergétiques personnels ou collectifs.

L'intelligence du bâtiment sera de pouvoir récolter de l'information, la traiter et la rendre à l'utilisateur sous une forme compréhensible par des personnes non techniciennes et occupées à la gestion de leur travail.

L'interface entre cet utilisateur et le bâtiment doit être simple et permettre d'un coup d'œil de savoir si ces conditions de confort ont un impacte positif ou négatif sur l'environnement, et d'un seul geste rétablir l'ordre des choses dans les paramètres gérant l'automatisme du bureau sur des valeurs optimisées du point de vue énergétique.

## 5 Etat des normes, labels et dispositions réglementaires

Les bâtiments de bureaux sont soumis à un grand nombre de normes qu'il serait inutile d'énumérer ici, il faut quand même noter celles qui touchent spécifiquement aux comforts, qualité de travail et performance énergétique dont :

Norme EN 15 232 : Performance énergétique des bâtiments -Impact de l'automatisation de la régulation et de la gestion technique du bâtiment“

Norme EN 15251 : Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique.

Norme EN 13 779 : Ventilation des bâtiments non-résidentiels – Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air.

Norme EN-ISO 7730 : 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.

Norme NF EN 12464-1

Code du travail 4323-1 définissant les niveaux d'éclairage minimums par type de locaux.

En [Annexes 6.7](#), un tableau comparatif des différents Labels (HQE, BREEAM, LEED) sur les différents critères de confort abordés dans ce document.

## 6 Annexes

Les Annexes ou fiches thématiques approfondissent chaque critère du confort, elles sont une source importante et pertinente réalisée par des professionnels et scientifiques du bâtiment.

### ***6.1 Annexe Confort et Performance: Etude de l'INES pour le GIE***

Est publié ci-après l'intégralité de l'étude de l'INES dont certaines parties ont été extraites dans le corps du livre blanc.



## Rapport technique DTS/DR/2011/062

# GIE Enjeu Energie Positive Contribution INES au livre blanc 2011

*Auteur (s) : ALESSI Franck, BARTHELME Anne-France, RENZI Virginie*

Référence PRODEM	10-03431
Titre du projet	GIE Enjeu Energie Positive
Type de projet	Industriel
Période du projet	15/11/2010 – 20/01/2011
Nature du rapport	<input type="checkbox"/> Intermédiaire <input type="checkbox"/> Final <input checked="" type="checkbox"/> Contribution à un rapport global <input type="checkbox"/> Rapport de tâche (WP)
N° livrable:	<input type="checkbox"/> Autres (précisez)

	Rédacteurs	Vérificateur	Approbateur	Emetteur
<b>Nom</b>	ALESSI F. BARTHELME A-F. RENZI V.	BEJAT T.	BURGUN F.	CLAVELIER L.
<b>Fonction</b>	Ingénieurs de Recherche	Ingénieur de Recherche	Chef du Laboratoire	Chef de département

### Résumé

Le GIE « Enjeu Energie Positive », créé à l'initiative de Bouygues Immobilier en 2008, se donne pour objectifs de :

- diminuer la consommation énergétique des futurs immeubles de bureau dans leur phase d'exploitation,
- contribuer à l'augmentation de leur capacité de production d'énergies renouvelables,
- optimiser le bilan carbone du cycle de vie d'un immeuble.

La collaboration avec le CEA se fera au travers du Laboratoire d'Energétique du Bâtiment (LEB), basé à l'INES, spécialisé notamment en Qualité des Environnements Intérieurs (QEI), qui apportera sa contribution au groupe de travail dédié à la thématique « Santé, confort et qualité dans les immeubles tertiaires, et exigence énergétique ».

L'objectif de cette étude est de participer à la rédaction du 2ème livre blanc du GIE, prévu pour début 2011. Cette contribution portera notamment sur le couplage entre les aspects énergétiques et la QEI.

## Plan du document

<b>1.</b>	<b>Contexte et rappels généraux .....</b>	
1.1.	<i>La notion de confort.....</i>	32
1.2.	<i>Consommations énergétiques des bâtiments tertiaires.....</i>	33
1.3.	<i>Le problème des surchauffes dans les bâtiments tertiaires .....</i>	15
<b>2.</b>	<b>Couplage QEI et impacts énergétiques .....</b>	
2.1.	<i>Couplage confort thermique et consommations énergétiques .....</i>	35
2.2.	<i>Couplage Qualité de l'Air Intérieur (QAI) et consommations énergétiques .....</i>	37
2.3.	<i>Couplage confort visuel et besoins énergétiques.....</i>	41
2.4.	<i>Couplage confort acoustique et besoins énergétiques.....</i>	44
<b>3.</b>	<b>Voies d'amélioration .....</b>	
3.1.	<i>Techniques dites actives .....</i>	22
3.2.	<i>Techniques dites passives .....</i>	24
<b>4.</b>	<b>Synthèse et recommandations .....</b>	

## **1. Contexte et rappels généraux**

### **1.1. La notion de confort**

Dans les espaces intérieurs, la quantification et qualification du « bien-être » d'un ou de plusieurs individus nécessitent une étude approfondie. Appliquée à l'aménagement des bâtiments tertiaires, la notion de confort au travail est un enjeu important tant elle impacte à la fois la productivité des employés et la facture énergétique du bâtiment.

Il convient de distinguer deux notions proches et interdépendantes : le confort et le bien-être. Les considérations physiques et matérielles du confort rassemblent la Qualité des Environnements Intérieurs (QEI) qui se décompose en quatre axes (la qualité de l'air intérieur, le confort thermique, le confort acoustique, et le confort visuel). A cela il faut ajouter les paramètres de l'ergonomie. La QEI dépend également de paramètres propres à l'occupant : taille, poids, sexe, âge, état de santé, etc. ainsi que des aspects de tranquillité psychologique et morale.

*Remarque : La norme NF EN 15251 explicite les critères d'ambiance intérieure (QAI, CT, CA, CV) pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments.*

Le bien-être des occupants est une notion plus subjective qui englobe des paramètres psychologiques, sociaux et culturels : les relations professionnelles, l'ouverture sur l'extérieur, la perception de l'espace de travail (ex. la couleur des revêtements), la possibilité d'agir sur son environnement, le sentiment d'appartenance, ... sont autant de facteurs qui vont agir sur la productivité des employés.

Le confort est généralement mesuré par le taux d'insatisfaction des occupants. On considère qu'une proportion d'insatisfaits faible est jugée comme acceptable. Il faut cependant garder en tête qu'un confort trop stable peut être ennuyeux, et que des variations de l'environnement sont parfois bienvenues [6].

L'amélioration du confort des occupants ne doit pas être obtenue au détriment de la performance énergétique du bâtiment. Et réciproquement, la réduction de la facture énergétique d'un bâtiment ne doit pas se faire au détriment du confort de ses occupants. Il est donc nécessaire de réguler au plus juste les ambiances intérieures dans un gage d'efficacité énergétique, sur la base des différents axes de confort précédemment évoqués. Allier confort, productivité et économie d'énergie est une problématique faite d'équilibres et de compromis.

---

<sup>6</sup> Claude-Alain Roulet, *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. 2004



## 1.2. Consommations énergétiques des bâtiments tertiaires

Les besoins en chaud, froid et ventilation représentent aujourd'hui la part la plus importante de la facture énergétique des bâtiments tertiaires du parc existant. Dans un souci croissant de réduction des consommations énergétiques, certains des bâtiments tertiaires performants actuels (type BBC, BEPOS) sont conçus de façon à minimiser la consommation des systèmes actifs de Chauffage-Ventilation-Climatisation (CVC). De fait, les consommations énergétiques principales se répartissent différemment (figure 1).

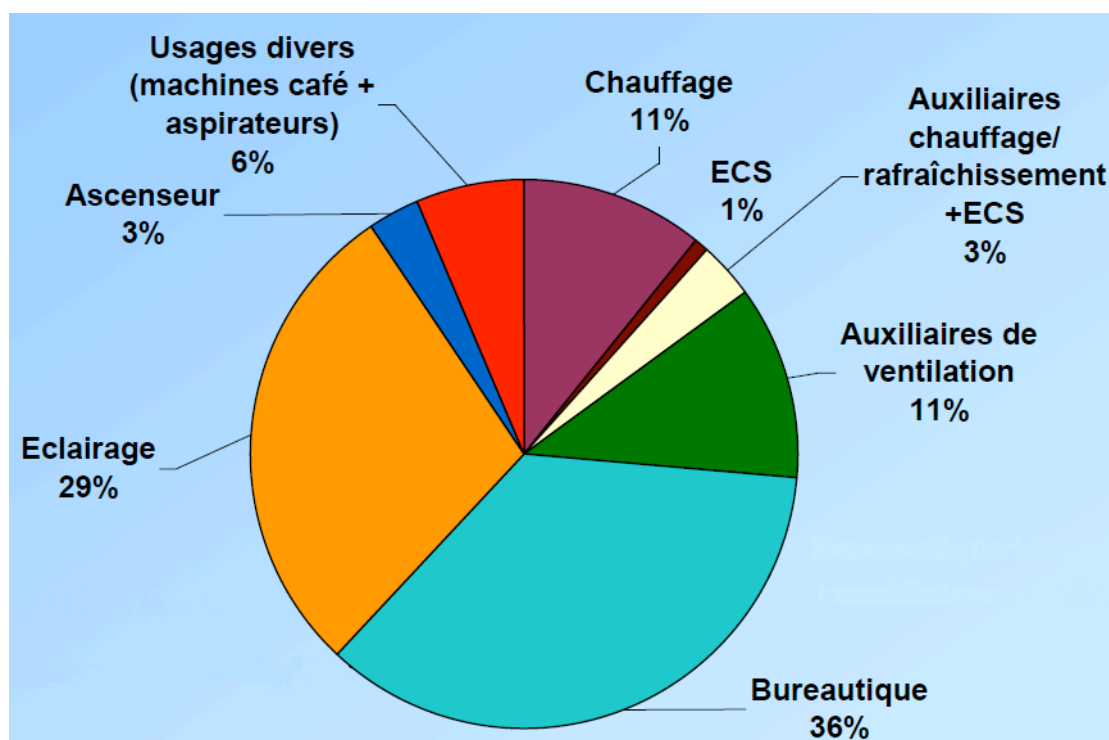


Figure 1 : Répartition des différents postes de consommations énergétiques - Bâtiment de bureaux BEPOS (consommation totale tous usages : 26.4kWhélec/m<sup>2</sup>/an), ZAC Bouchayer Viallet, Grenoble - Architecte : T.Roche – Source : Enertech.

Avec l'amélioration continue de l'enveloppe (nouveaux matériaux, isolation renforcée, vitrages performants, ...) et la prise en compte du bioclimatisme en phase amont de la conception du bâtiment (gestion optimale des apports solaires passifs), les besoins en chauffage tendent à se réduire pour ne représenter qu'une part minime des consommations (dans cet exemple, 11% pour le poste chauffage contre parfois plus de 50% dans un bâtiment déperditif). Les besoins en climatisation sont minimisés par un contrôle solaire optimisé ; Il faudra cependant assurer l'évacuation des charges internes par la mise en œuvre de stratégies actives ou passives de rafraîchissement.

Les postes éclairage artificiel, informatique et ventilation deviennent alors prépondérants, et peuvent représenter plus de 75% des consommations totales. Dans les bâtiments performants, les appareils mis en œuvre pour ces postes sont souvent à faible consommation d'énergie mais leur multiplicité et pour certains leur mode régulation en font des postes de consommation importants. En effet les éléments de bureautique et les systèmes de CVC et d'éclairage artificiel ont souvent des fonctionnements continus et sont régulés sur des zones très étendues du bâtiment alors qu'un zonage fin et adéquat permettrait des économies notables.

On trouve également dans les immeubles de bureaux, de nombreux équipements dont la consommation n'est pas négligeable : machines à café, boissons, friandises et fontaines à eau. A titre d'exemple, on peut citer le cas des machines à boissons réfrigérées qui consomment sur une année autant que près de 10 ordinateurs.

### 1.3. Le problème des surchauffes dans les bâtiments tertiaires

Les immeubles tertiaires sont caractérisés d'une part par des charges internes élevées (principalement postes éclairage et bureautique) et d'autre part, par leur importante surface vitrée et de ce fait, par des apports solaires conséquents parfois difficiles à contrôler. A cela s'ajoutent souvent une compacité élevée et une forte densité d'occupation. L'ensemble de ces facteurs contribue à un des problèmes majeurs des bâtiments tertiaires : les surchauffes ; et ce même lorsque la température extérieure est basse. Il est d'ailleurs fréquent dans certains immeubles tertiaires actuels de grand volume d'avoir une simultanéité des besoins : alors que les bureaux situés en façade Nord ont besoin de chauffer, les bureaux situés en façades Sud peuvent au même moment avoir besoin de rafraîchir. La conception architecturale des bâtiments performants (de type bioclimatique c'est à dire intégrant au mieux la course du soleil et l'environnement proche du bâtiment tel que le vent, les masques, la végétation ...) devrait limiter voire faire disparaître ce phénomène.

Le confort d'été est lié à de nombreux paramètres dont certains ont un impact fort :

→ La température d'air, paramètre le plus influent, est aussi le plus évident.

→ La température moyenne radiative correspond à la température des surfaces environnantes perçue par l'occupant.

→ La teneur en eau de l'air joue également un rôle important. Le taux d'humidité relative intérieure, pour être dans des conditions de confort, doit en général être compris entre 30 et 70%. Cependant, après une forte pluie, ce taux peut atteindre 80, 90 voire même 100%. En été, lorsque la température atteint 25°C, cette humidité crée une certaine moiteur et l'impossibilité pour le corps humain d'évaporer ; ceci accentue la sensation de chaleur ; il peut alors être nécessaire de déshumidifier.

→ La vitesse de l'air a également une influence forte sur le ressenti de l'occupant ; les courants d'air, souvent désagréables en hiver, peuvent apporter dans une certaine mesure un effet rafraîchissant intéressant en période estivale (ce qui permet de garder une température d'air plus élevée et peut se traduire par une économie d'énergie importante).

Enfin, en plus de l'environnement immédiat, des paramètres propres à chaque occupant influent sur le confort d'été tels que le métabolisme (activité sédentaire, dynamique...) et la tenue vestimentaire. Ce dernier point, qui paraît découler du bon sens pour la majorité, n'est pourtant pas toujours mis en application, parce que parfois difficilement conciliable avec le monde professionnel et nos modes de vie modernes ; avant d'enclencher la climatisation, il suffit parfois de se dévêtir un peu pour retrouver un niveau de confort satisfaisant.

## 2. Couplage QEI et impacts énergétiques

***Dans la suite de ce rapport, le confort des occupants sera traité principalement par les aspects physiques, physiologiques et chimiques ; les aspects plus subjectifs liés à la notion de bien-être ne seront abordés que pour les recommandations.***

### 2.1. *Couplage confort thermique et besoins énergétiques*

Afin d'allier au plus juste, performance énergétique et ambiances thermiques intérieures, il est nécessaire de se baser sur des indices de confort thermique tels que ceux définis dans la norme internationale ISO 7730.

Cette norme présente le confort thermique comme une notion subjective régie par quatre paramètres d'ambiance (température d'air, température moyenne radiative, vitesse relative de l'air associée à son degré de turbulence, humidité relative) et deux paramètres propres à l'occupant (son métabolisme dit « activité », et son isolement thermique vestimentaire dit « vêtue »).

Une régulation intelligente du bien-être thermique des occupants, couplée à l'énergétique du bâtiment n'est pas uniquement basée sur la température d'air mais sur l'ensemble des six paramètres précédemment évoqués.

### Chauffage & climatisation

Les critères d'ambiance thermique s'appuient sur les indicateurs de confort thermiques PMV-PPD (Vote Moyen Prévisible - Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits). Le modèle PMV, développé par P.O Fanger dans les années 1970, prend en compte les 4 paramètres d'ambiance et les 2 paramètres propres à l'occupant définis au paragraphe 1.3.

L'indice PMV est un modèle calculant la sensation thermique statistique d'une population donnée dans une ambiance intérieure donnée ; cet indice est basé sur une échelle de sensation thermique à 7 niveaux (Tableau 1). Cet indice permet d'obtenir un pourcentage statistique d'occupants insatisfaits par leur confort thermique (noté PPD). Remarque : pour un PMV de 0 (ambiance thermique confortable) il y a un pourcentage résiduel de 5% d'insatisfaits.

Tableau 1: Echelle de sensation thermique à 7 niveaux de Fanger

(-3)	très froid	insatisfait parce que trop froid
(-2)	froid	
(-1)	frais	satisfait
(0)	confortable	
(+1)	tiède	
(+2)	chaud	insatisfait parce que trop chaud
(+3)	très chaud	

La valeur de température de consigne peut varier parmi les valeurs présentées (Tableau 2) afin de prendre en compte, par exemple, l'habitude locale ou le désir d'économiser de l'énergie tant que la variation journalière de température de dimensionnement se situe dans la plage donnée et que les occupants ont le temps et l'opportunité de s'adapter à la température de dimensionnement modifiée.

Type de bâtiment ou d'espace	Catégorie	Plage de température pour le chauffage, °C Vêtire ~ 1,0 clo	Plage de température pour le rafraîchissement, °C Vêtire ~ 0,5 clo
Bureaux et locaux à activité similaire (bureaux individuels ou paysagés, salles de réunion, auditoriums, cafétérias, restaurants, salles de classe) Activité sédentaire ~1,2 met	I	21,0 – 23,0	23,5 – 25,5
	II	<b>20,0 – 24,0</b>	<b>23,0 – 26,0</b>
	III	19,0 – 25,0	22,0 – 27,0

Tableau 2: Exemple de plages pour le calcul horaire de l'énergie de chauffage et de rafraîchissement pour trois catégories d'ambiances intérieures (Cf. NF EN 15251)

Les classes de confort A, B et C définies dans l'EN ISO 7730 sont respectivement équivalentes aux classes I, II et III de l'EN 15251.

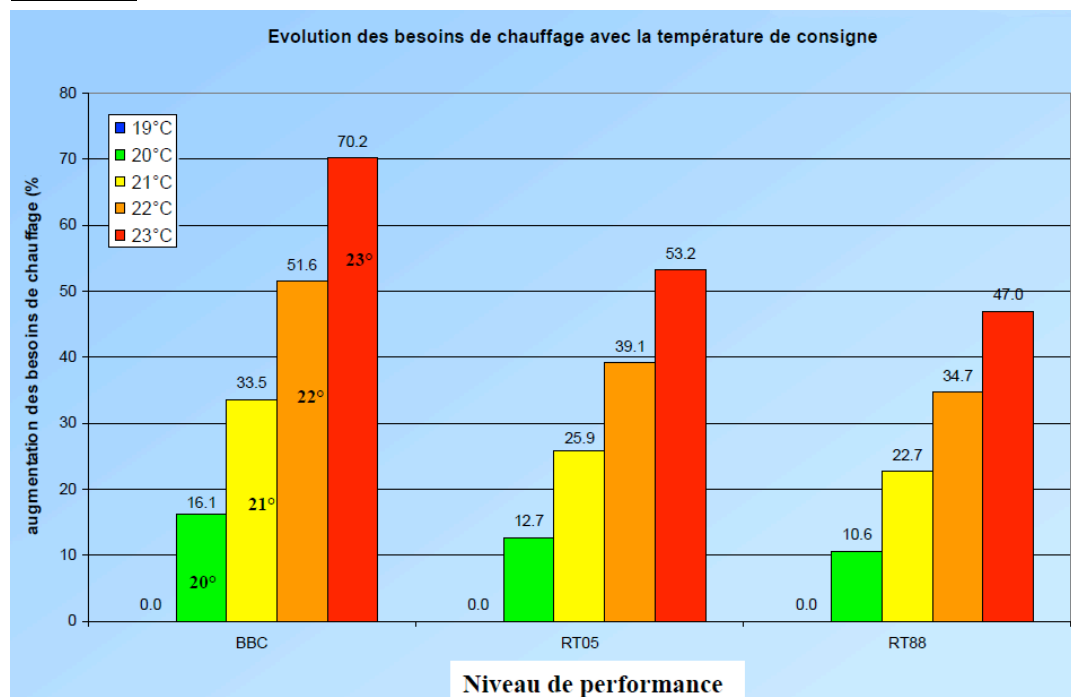
Catégorie I (classe A):  $-0.2 < PMV < +0.2$

**Catégorie II (classe B):  $-0.5 < PMV < +0.5$  (catégorie recommandée par l'EN 15251 pour les bâtiments de type bureaux)**

Catégorie III (classe C):  $-0.7 < PMV < +0.7$

C'est essentiellement en jouant sur la température de consigne qu'on peut influencer à la fois le confort thermique et la consommation énergétique. A titre d'exemple, une étude de 2008 [7] a montré que la diminution de la température de consigne de rafraîchissement de 1°C entraîne une augmentation moyenne de 6% de la consommation électrique totale d'un bâtiment tertiaire (construction des années 2000). Cette surconsommation atteint 12 à 15% dans les bâtiments performants type BBC, BEPOS, etc. (voir figure 2).

Figure 2 : Evolution des besoins de chauffage avec la température de consigne pour des bâtiments tertiaires de niveaux de performance BBC, RT2005 et RT1988 – Source : Eneritech.



<sup>7</sup> Athhajariyakul S., Lertsatittanakorn C., 2008 \_ "Small fan assisted air conditioner for thermal comfort and energy saving in Thailand". Energy conversion and management 49 (2008) 2499-2504

Les inconforts locaux peuvent provoquer des hausses importantes de consommation de chauffage en hiver ; l'exemple le plus souvent rencontré étant la sensation de « pieds froids » qui pousse l'occupant à augmenter la température de consigne alors que la température d'air du bureau peut atteindre jusqu'à 25°C.

## 2.2. Couplage Qualité de l'Air Intérieur (QAI) et besoins énergétiques

La qualité de l'air intérieur est un sujet de préoccupation grandissant tant au niveau des professionnels de santé et des pouvoirs publics, que de la population. Rappelons que les citoyens passent environ 90% de leur temps dans des espaces intérieurs et que la pollution atteint des niveaux de concentration souvent plus élevés qu'à l'extérieur [8].

Le premier plan national santé et environnement (PNSE1 :2004-2008) a permis des avancées sur la connaissance des pollutions des environnements intérieurs, avec notamment le lancement par l'OQAI (Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur) des premières enquêtes de grande ampleur sur la qualité de l'air dans les logements et dans les écoles. Ce thème a été retenu comme prioritaire pour le deuxième plan national santé environnement (PNSE2 : 2009 – 2013). Ce nouveau plan synthétise l'ensemble de la politique actuelle du gouvernement en matière de prévention des risques liés à la mauvaise QAI. Il vise la réduction des risques liés aux agents chimiques, physiques et biologiques et renforce la connaissance et la limitation des sources de pollution (interdire les CMR [9] ; cibler le formaldéhyde ; étiquetage obligatoire).

Les sources de cette pollution intérieure sont variables : sources biologiques (personnes, animaux, insectes, plantes d'intérieur, moisissures...), produits de construction et équipements de bâtiment (bâtiment et matériaux, système de ventilation, mobilier, ...), activité intérieure (produits sanitaires, bricolage, fumée de tabac...), et pollution de l'air extérieur (industries, transports, ...). Toutes ces sources sont à l'origine d'une pollution de l'air intérieur classée en trois grands groupes : la pollution chimique (produits de synthèses), physique (poussières, radon...) et biologique (bioeffluents, moisissures, microbes...).

Améliorer la QAI passe tout d'abord par la connaissance de notre environnement intérieur. De quel type de mobilier l'occupant est-il entouré ? Quels sont les matériaux de construction ? Y-a-t-il des sources de pollution spécifique ?

D'autre part, cette amélioration passe par l'application de solutions pour améliorer l'air que nous respirons. Y-a-t-il un système garant du bon taux de renouvellement d'air ? Est-il bien dimensionné et en état de marche ? Est-il entretenu régulièrement ? Faut-il aérer, i.e. diluer la pollution, ou épurer, i.e. traiter l'air ?

Cette amélioration passe par l'application de solutions afin de rendre meilleur l'air que nous respirons. Un bon air intérieur repose dans un premier temps sur le contrôle des sources polluantes. Cette idée élémentaire consiste à éviter d'ajouter des charges polluantes en limitant au maximum voire en éliminant tous risques d'émissions de polluants chimiques, physiques, ou biologiques dues à notre mode de vie, au mobilier... . Malheureusement, si l'on se place du point de vue des émissions liées au mobilier et aux matériaux de construction, de faibles émissivités de polluants s'accordent souvent avec des coûts élevés

<sup>8</sup> Azuma K., Uchiyama I. and Ikeda K. ; The risk screening for indoor air pollution chemicals in Japan. ; risk analysis, 27(6) [2007 : pp. 1623-1638]

<sup>9</sup> CMR= Cancérogènes, Mutagènes, et toxiques pour la Reproduction

de la matière première utilisée lors de la conception de ces derniers. De plus, la caractérisation des émissions inhérentes aux matériaux, mobiliers et produits chimiques, se développe peu à peu sans pour autant être exhaustive (ex. : FDES [10], REACH, M1 Emission class for building material, Green Guard, ...).

Une solution simple consiste à aérer le bureau une dizaine de minutes par jour [11]. Cependant cette solution est à réserver aux bâtiments bénéficiant d'un environnement extérieur favorable pour la qualité de l'air et le niveau de bruit (attention à éviter les périodes de grand trafic routier si le bâtiment est situé près d'un axe à forte circulation de type autoroute, sorties de tunnels, voies périphériques, ...). Il est difficile d'évaluer la rigueur des utilisateurs sur ce type de solution, ainsi le meilleur moyen est de le faire d'une façon automatisé en dehors des heures d'ouverture. Les aspects de sécurité entrent également en jeu, notamment pour les écoles et les immeubles de grande hauteur, bâtiments dans lesquels on rencontre de plus en plus de fenêtres fixes.

Pour les bâtiments tertiaires, la législation préconise un système de ventilation mécanique assurant un taux de renouvellement d'air (TRA) réglementaire. Cette technique est efficace si le système est correctement dimensionné au besoin réel du local considéré. Elle est également garante d'économies d'énergie grâce au contrôle des débits, à la possibilité de les adapter aux besoins et à la possible récupération de chaleur (VMC double flux avec récupération de calories sur l'air extrait). Ces systèmes permettent aussi, si nécessaire, de traiter l'air avant son admission dans les locaux et de protéger l'air intérieur du bâtiment des pollutions extérieures.

Enfin, on assiste au retour en force de la ventilation naturelle (voir tableau 3), une solution qui apparait de plus en plus souvent dans les projets de bâtiments visant une faible consommation. Ce système est malheureusement difficilement contrôlable et dépend des conditions météorologiques extérieures (effet de tirage thermique lié aux écarts de température intérieur/extérieur, vitesse et direction du vent, différence de pression intérieur/extérieur), à l'origine de l'écoulement naturel de l'air dans le local. L'air pénètre dans le bâtiment par des entrées d'air qui peuvent être des grilles en traversée de parois, des conduits horizontaux ou verticaux. L'air est extrait par des bouches d'extraction qui peuvent être montées en traversée de paroi (en partie haute de la pièce) ou raccordées à un conduit d'extraction. Ce système n'est généralement pas capable d'intégrer une fonction épuration d'air (même pas de filtre mécaniques) du fait de son manque de réserve de pression disponible, ainsi l'air extérieur entre sans traitement à l'intérieur. Dans les milieux très urbanisés cette solution n'est pas acceptable. De plus les ouvertures importantes que nécessite la ventilation naturelle peuvent se révéler incompatible avec les contraintes d'isolation acoustique, notamment en milieu urbain.

La ventilation naturelle peut être complétée par un complément de ventilation mécanique pour assurer un TRA réglementaire et une dépollution minimale.

---

10 FDES : Fiches de déclarations environnementales sanitaires : source FDES.fr

11 [http://www.inpes.fr/30000/images/0904\\_air\\_interieur/Guide.pdf](http://www.inpes.fr/30000/images/0904_air_interieur/Guide.pdf) «Guide de la pollution de l'air intérieur »

Tableau 3: Avantages et inconvénients de la ventilation naturelle

Méthode	Moyens techniques	Avantages	Inconvénients
Ventilation naturelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Basée sur le tirage thermique lié à : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ La hauteur du bâtiment</li> <li>○ La présence/direction du vent</li> <li>○ La différence de température intérieure/extérieure</li> <li>○ Entrée d'air en partie basse du logement</li> <li>○ Sortie d'air en partie haute du logement</li> <li>○ La différence de pression intérieure/extérieure</li> <li>...</li> </ul> </li> <li>▪ Orientation des ouvertures suivant les vents dominants</li> </ul>	Economies d'énergie (uniquement pour la mise en mouvement de l'air)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ En été, pas ou peu de tirage thermique</li> <li>▪ En hiver, inconfort des courants d'air</li> <li>▪ Pertes de chaleur</li> <li>▪ Risques d'inversion et refoulement de gaz brûlés, de fumées, d'air vicié et d'odeurs dans les logements situés aux avant-derniers étages.</li> <li>▪ Spécifique à un environnement donné (habitat, climat...)</li> <li>▪ Nécessité de compléter par une ventilation mécanique pour assurer le TRA.</li> </ul>

Pour finir, il existe des techniques actives de traitement d'air plus connues sous le nom d'épurateur d'air ou « Air Cleaner ». Certaines technologies embarquées dans ces systèmes sont fiables et permettent d'améliorer l'air en sortie (exemple les filtres mécaniques, les filtres à charbon actifs - CA, etc.). Leurs limites respectives sont le colmatage et le risque de relargage par température élevée (CA). Ces techniques augmentent aussi la perte de charge des systèmes de traitement d'air et donc leur consommation électrique. D'autres techniques, nécessitant de l'énergie électrique, semblent efficaces (ex. : la photocatalyse) mais sont souvent à l'origine de la formation de produits secondaires comme le formaldéhyde. Ces systèmes ne sont pas encore fiables, et leur innocuité et leur consommation énergétique restent à améliorer.

### Contexte normatif

Les valeurs par personne de débits de ventilation recommandés pour des bâtiments non résidentiels (voir tableau 4) supposent que le bâtiment et ses occupants sont sources de pollution. Les valeurs par unité de surface au sol supposent que les pollutions proviennent des émissions de matériaux. La ventilation dans le bâtiment doit être conçue en supposant toutes les sources de pollution présentes. Différentes méthodes peuvent être utilisées dans ce but : parfois les valeurs calculées par personne et par unité de surface au sol sont additionnées, parfois la valeur la plus élevée est retenue, et parfois c'est une valeur comprise entre la valeur la plus élevée et la valeur obtenue par addition.

Tableau 4 : Exemples de débits de ventilation recommandés pour les bâtiments non résidentiels pour trois catégories [12] de pollution dues au bâtiment lui-même. Les taux sont donnés par personne ou par m<sup>2</sup> de surface au sol [EN 15251].

Catégorie	Débit par personne (l/s/pers)	Débits pour les pollutions dues aux émissions du bâtiment (l/s/m <sup>2</sup> )		
		Bâtiment très peu polluant	Bâtiment peu polluant	Autres bâtiments
I	10	0,5	1	2
II	7	0,35	0,7	1,4
III	4	0,2	0,4	0,8

De même que pour le confort thermique, la norme EN 15251 préconise de respecter les exigences de la catégorie II pour les bâtiments de bureaux.

### Contexte réglementaire

Le tableau 5 ci-dessous présente un extrait de la réglementation en vigueur pour les bâtiments tertiaires.

Tableau 5: Réglementation relative à la ventilation dans le tertiaire

Extrait de l'article 64.1 du règlement sanitaire départemental type.

Détermination du renouvellement d'air minimal - locaux d'entrée		
désignation des locaux	débit minimal d'air neuf en m <sup>3</sup> /h et par occupant (air à 1,2 kg/m <sup>3</sup> )	
	locaux avec interdiction de fumer	locaux sans interdiction de fumer
locaux d'enseignement: classes, salles d'études, laboratoires (à l'exclusion de ceux à pollution spécifique), écoles maternelles, élémentaires et collèges	15	
autres établissements	18	25
ateliers	18	25
locaux d'hébergement: chambres collectives (au moins 3 personnes), dortoirs, cellules, salles de repos	18	25
bureaux et locaux assimilés: locaux d'accueil, bibliothèques, bureaux de poste, banques	18	25
locaux de réunions: salles de réunions, de spectacles, de culte, clubs, foyers	18	30
locaux de vente: boutiques, supermarchés	22	30
locaux de restauration: cafés, bars, restaurants, cantines, salles à manger	22	30
locaux à usage sportif:		
par sportif, dans une piscine	22	
par sportif, dans les autres locaux	25	30
par spectateur	18	30

<sup>12</sup> I : Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec

des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.

II : Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.

III : Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.



Extrait de l'arrêté 64.2 du règlement sanitaire départemental type.

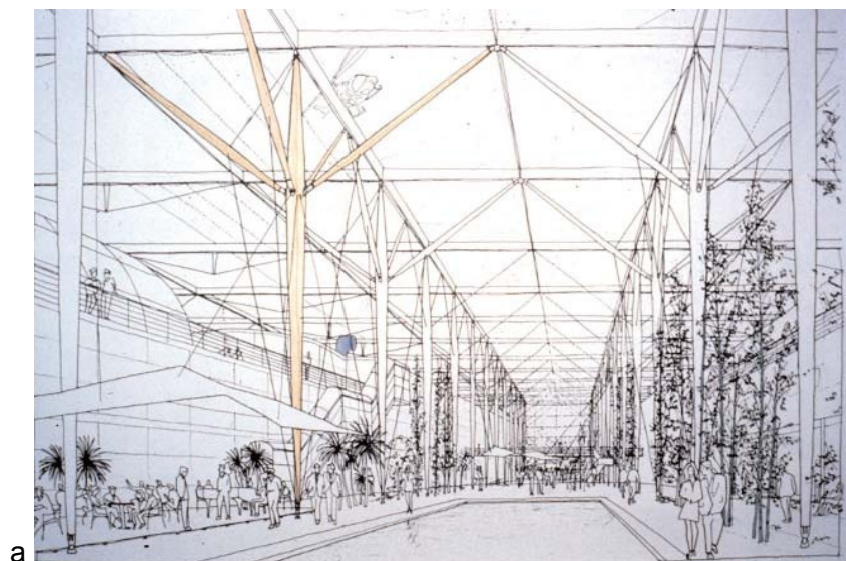
<b>Détermination du renouvellement d'air minimal - locaux de sortie</b>	
<b>désignation des locaux</b>	<b>débit minimal d'air neuf en m<sup>3</sup>/h</b>
<b>■ pièces à usage individuel</b>	
salle de bains ou de douches	15 par local
salle de bains ou de douches commune avec cabinet d'aisances	15 par local
cabinet d'aisances	15
<b>■ pièces à usage collectif</b>	
cabinet d'aisances isolé	30
salle de bains ou de douches isolée	45
salle de bains ou de douches commune avec cabinet d'aisances	60
bains, douches et cabinet d'aisances groupés	30 + 15 N*
lavabos groupés	10 + 5 N*
salle de lavage, séchage et repassage du linge	5 par m <sup>2</sup> de surface de local (1)
<b>■ cuisines collectives</b>	
office relais	15/repas
moins de 150 repas servis simultanément	25/repas
de 150 à 500 repas servis simultanément (2)	20/repas
de 501 à 1500 repas servis simultanément (3)	15/repas
plus de 1500 repas servis simultanément (4)	10/repas
<i>N* : nombre d'équipements dans le local</i>	
<i>(1) : compte tenu des contraintes techniques, les débits retenus seront arrondis au multiple supérieur de 15</i>	
<i>(2) : avec un minimum de 3 750 m<sup>3</sup>/h</i>	
<i>(3) : avec un minimum de 10 000 m<sup>3</sup>/h</i>	
<i>(4) : avec un minimum de 22 500 m<sup>3</sup>/h</i>	

### 2.3. Couplage confort visuel et besoins énergétiques

Avec l'évolution actuelle du bâtiment vers des constructions moins énergivores et plus confortables (RT2012/ Bâtiment BBC/ PassivHaus/ MINERGIE / EFFINERGIE / Démarche HQE® / LEED / BREEAM), le confort visuel et les besoins énergétiques inhérents au recours à l'éclairage artificiel deviennent des points essentiels dans la conception des bâtiments tertiaires (ou dans leur processus de rénovation).

Le confort visuel ne s'apparente pas uniquement à un niveau d'éclairement ; de nombreux paramètres tels que la distribution des luminances, les contrastes, l'accès à la lumière naturelle, les éblouissements ... interviennent dans cette notion. La recherche de l'éclairage naturel optimal permet d'associer un bon confort visuel et une diminution des consommations liées à l'éclairage artificiel. Le dimensionnement des ouvertures et de leurs protections solaires associées, spécifiquement à chaque projet permettra d'offrir un bon accès à la lumière naturelle et un bon niveau d'éclairement dans les bureaux. La figure 3 ci-dessous présente l'exemple d'une rue intérieure permettant un accès à la lumière naturelle.

Figure 3 (a et b) : Exemple d'accès à la lumière naturelle : Rue intérieure de l'Académie de formation (Herne-Sodingen, Allemagne) Françoise-Hélène Jourda Architectes



a



b

Le fort impact de l'accès ou de l'absence d'accès à la lumière naturelle sur les consommations d'éclairage artificiel, a pu être observé par le retour d'expérience de la Tour Elithis : dans ce projet, 50% des consommations d'éclairage artificiel sont dus à 7% des surfaces (parkings, cages d'escalier et hall d'entrée). La faible représentation des bureaux dans le besoin total d'éclairage du bâtiment s'explique en grande partie par la part importante de surface vitrée du bâtiment (75% de l'enveloppe).

Le recours à l'éclairage artificiel étant cependant inhérent à tout bâtiment, une installation performante de type luminaires fluorescents T5 longue durée de vie & ballast électronique haut rendement, lampes fluocompactes, technologies à LED, et dans un futur proche les innovants systèmes à OLED ; commandée par un système de gestion intelligente (détecteurs de présences/ sondes d'éclairage/ minuterie ...) permettra de limiter les consommations liées à l'éclairage artificiel.

La mise en œuvre soignée et le bon paramétrage des systèmes de gestion d'éclairage ont un rôle primordial dans les gisements d'économies d'énergie possibles. En effet, dans le cadre du retour d'expérience du bâtiment Millénaire (groupe ICADE) [13], la réduction des heures de fonctionnement de l'éclairage du parking par la mise en œuvre et le réglage adéquat d'un système de gestion adapté aux heures d'occupation, offre un potentiel de 60% d'économies en comparaison avec un fonctionnement 24h/24 de l'éclairage dans ces locaux.

De même que pour le bâtiment Millénaire, le retour d'expérience du bâtiment de l'INEED Rhône-Alpes a montré l'importance du bon paramétrage des systèmes de gestion de l'éclairage, mais également l'impact des consommations électriques liées à leur fonctionnement. La consommation totale d'éclairage du projet INEED est de 6.2 kWhel/m<sup>2</sup>SU/an (consommation environ 4 fois inférieure à celles constatées dans des immeubles de bureaux « classiques » en Rhône-Alpes – étude menée sur 50 bâtiments en 2004). 8% des consommations d'éclairage sont absorbés par les détecteurs de présence, cellules photosensibles et autres dispositifs de gradation dont la puissance en veille est de 1 à 3 W (et jusqu'à 18W pour les gradateurs).

Malgré des consommations d'éclairage mesurées relativement faibles, la première année d'exploitation du bâtiment met en avant l'importance du paramétrage des dispositifs de contrôle et le gisement d'énergie important (jusqu'à 35%) lié à son optimisation. Quelques exemples d'illustration ci-après :

→ L'éclairage extérieur consomme 1.4 kWhel/m<sup>2</sup>SU/an dont la quasi-totalité est due à un fonctionnement sur horloge de 22h à 6h : période d'inoccupation et de fermeture du bâtiment. L'optimisation du système de gestion de l'éclairage extérieur (fonctionnement nocturne uniquement pendant les horaires d'ouverture du bâtiment) permettra de diminuer de 17% la consommation totale d'éclairage.

→ 65% des consommations d'éclairage de la salle de conférence, ont lieu en période d'inoccupation. L'ajustement des gradateurs à la présence effective dans cette salle permettra 4% d'économie sur la consommation totale d'éclairage.

→ Une réduction de 40% des consommations d'éclairage dans les escaliers est possible en améliorant le fonctionnement des détecteurs de présence et de luminosité.

→ 36% de la consommation d'éclairage des salles de réunion est dû à la veille des gradateurs. Deux salles uniquement en sont pourvues. Dans ces deux salles, respectivement 73% et 52% des consommations d'éclairage sont dues à la veille des gradateurs.

→ 10% des consommations d'éclairage des circulations, 25% des consommations d'éclairage des sanitaires, 83% des consommations d'éclairage des locaux annexes (type local douche) sont dus à la veille des détecteurs de présence. Pour des éclairages très peu sollicités (ex. locaux annexes du bâtiment INEED), la mise en place d'une gestion de l'éclairage par minuterie sera mieux adaptée.

Les résultats obtenus après un an d'exploitation du bâtiment montrent l'importance des consommations en phase d'utilisation mais également en régime passif notamment au niveau de la gestion de l'éclairage. Une attention particulière doit être accordée pour la mise en œuvre de systèmes performants (puissances de veilles inférieures au Watt). Les réglages des commandes d'éclairage (temporisation, seuils de déclenchement, etc.) sont à effectuer avec le plus grand soin à la livraison du bâtiment et doivent être « verrouillés ». Ceci afin d'éviter toute dérive liée à l'utilisateur.

<sup>13</sup> Projet REBU, rapport final appel à projets PREBAT 2007 ; Sébastien ILLOUZ, Orlando CATARINA – 15/12/09 ; rapport disponible sur [www.prebat.net](http://www.prebat.net)

Les systèmes de gestion de l'éclairage sur lesquels les occupants n'ont aucune maîtrise, peuvent cependant poser problème :

→ Les interrupteurs automatiques sont parfois inefficaces avec une détection décalée de présence ou d'absence des occupants (lumière éteinte avec présence de personnes / lumière allumée en l'absence de personnes).

→ Les sondes d'éclairage et leur ajustement vis-à-vis des changements d'intensité apparaissent parfois mal étalonnée voire désactivée (délai de quelques minutes avant prise en compte de l'information lors de la mise dans l'obscurité d'un local / Luminaires allumés en présence d'un niveau d'éclairage naturel suffisant).

Le retour d'expérience du pôle d'accueil INERIS a montré une perte d'habitude des occupants vis-à-vis de l'extinction manuelle des lumières, avec la mise en place de systèmes de gestion automatisés. En effet, chaque bureau du pôle d'accueil est équipé d'un interrupteur manuel offrant à l'occupant la possibilité de forcer le dispositif de gestion d'éclairage automatisé. Lorsque l'utilisateur a pris la main, on constate fréquemment que celui-ci oublie d'éteindre les lumières lorsqu'il quitte son espace de travail, impactant ainsi les consommations énergétiques d'éclairage artificiel du bâtiment.

Un aspect supplémentaire souligné par le retour d'expérience d'opérations HQE notamment, concerne l'éblouissement des espaces du travail. Les bureaux fortement vitrés reçoivent trop de lumière si la conception architecturale n'a pas prévu des masques fixes. Ainsi les utilisateurs sont éblouis, ils baissent les stores et allument l'éclairage artificiel afin d'obtenir un niveau de lumière suffisant mais non éblouissant.

#### *2.4. Couplage confort acoustique et besoins énergétiques*

A proprement parler, l'acoustique n'a pas d'impact direct sur les consommations énergétiques dans le bâtiment. Le lien entre acoustique et énergie est indirect mais peut être établi dans le cas de systèmes CVC mal dimensionnés ou mal installés. De même, l'ouverture des fenêtres ou la ventilation naturelle peuvent favoriser la transmission de bruits extérieurs vers l'intérieur.

Notons que d'autres sources de bruit sont à l'origine d'inconforts acoustiques comme les bruits de choc, les bruits des équipements individuels, les types de bureaux (bureaux seuls, ou openspace), les bruits extérieurs comme les transports routiers ou aériens... Aucun lien direct n'a été mis en évidence entre ces nuisances et l'efficacité énergétique du bâtiment. Cependant on peut imaginer qu'en cas de gêne dû à un bruit extérieur, l'utilisateur favorise l'utilisation de la climatisation plutôt que l'ouverture des fenêtres.

#### **Systemes CVC, ventilateurs d'appoint**

Assurer confort thermique, qualité de l'air et niveau sonore acceptable, nécessite une conception avancée, une mise en œuvre soignée, un bon pilotage et une maintenance régulière des systèmes.

En fonction du niveau de confort préprogrammé ou souhaité par l'occupant, de problèmes d'installation ou de dimensionnement, les ventilateurs, bouches de soufflage, ventilateurs

d'appoint, etc. peuvent être à l'origine d'une augmentation du niveau sonore dans les espaces intérieurs.

Néanmoins, il est important de noter qu'un niveau minimum de bruit de fond peut avoir un effet bénéfique en limitant l'émergence de bruits plus ponctuels (discussions, bruits d'impacts, ...).

Il semble qu'un niveau sonore plus élevé, généré par les équipements, est mieux accepté par les occupants lorsque ces derniers gardent le contrôle dessus : +5 à +10dB(A)  **dans le cas d'un climatiseur** - Norme NF EN 15251.

L'élévation de la vitesse d'air en période estivale, s'avère être un bon moyen de rafraîchissement localisé (Cf. norme ASHRAE 55-2010). Cette technique pouvant être utilisée en complément du système de rafraîchissement existant. Cependant, il s'avère que bien trop souvent, ces solutions qui permettent d'abaisser la sensation thermique des occupants à leur poste de travail, ont des puissances non-négligeables, des vitesses d'air trop élevées et des niveaux sonores dépassant les valeurs normatives. Il est indispensable de bien choisir le système et de le dimensionner correctement.

Pour les bâtiments tertiaires de type bureaux, la norme EN 15251 :2007 (F) indique quelques niveaux de pression acoustique pondérés A, de conception :

bâtiment	type d'espace	dB(A)	
		plage type	valeur de conception par défaut
bureaux	petits bureaux	30 à 40	35
	salle de conférence	30 à 40	35
	bureaux paysagés	35 à 45	40
	bureaux compartimentés	35 à 45	40

Le pilotage des systèmes CVC peut également être source d'inconfort acoustique dans le cas de déclenchements intermittents d'un système à niveau de bruit élevé. Ces derniers sont généralement plus mal perçus que les bruits stationnaires, auxquels les occupants s'habituent plus facilement.

### Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est à l'origine de la propagation du bruit venant de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment ; le bruit se propageant par les grilles/conduites d'entrée et de sortie d'air sans rencontrer d'obstacles, présents dans un système de ventilation mécanique (comme des filtres par exemple)..

En règle générale, les critères acoustiques n'influencent pas la performance énergétique des bâtiments. Toutefois, il peut arriver que dans les bâtiments à ventilation naturelle, la quantité d'air extérieur exigée ne puisse être obtenue par ouverture des fenêtres car le bruit provenant de l'extérieur enfreindrait les critères (source : Norme EN 15251 :2007 (F)).

### 3. Voies d'amélioration

Sont présentés ici différents moyens pour améliorer conjointement le confort des occupants et l'efficacité énergétique.

### 3.1. Techniques dites actives

#### **Systemes CVC**

Il est important de garder à l'esprit qu'une approche systémique du confort nécessite de cibler les paramètres et indices les plus pertinents. Un des principaux actionneurs, sur lesquels les algorithmes de contrôle commande ou l'utilisateur peuvent impacter, est la ventilation couplée (ou pas) à un système de conditionnement d'air (ventilation généralisée pour l'ensemble du bâtiment/pièce ou personnalisée pour l'occupant).

Ce système peut être considéré comme l'articulation principale entre l'efficacité énergétique (EE), la qualité de l'air intérieur (QAI), le confort thermique (CT) et le confort acoustique (CA).

En effet, il impactera sur :

→ l'efficacité énergétique : en consommant plus ou moins d'énergie en fonction du débit de renouvellement d'air souhaité et/ou de la température de consigne fixée pour atteindre les objectifs de confort requis par ou pour l'occupant. La possibilité de moduler les débits de ventilation pour s'adapter aux besoins et de récupérer de l'énergie sur l'air extrait permettent aussi d'optimiser cette consommation d'énergie.

→ la QAI en traitant l'air extérieur avant son introduction dans le bâtiment et en diluant plus ou moins rapidement la charge polluante (humidité relative ou dioxyde de carbone dilués dans les bureaux et salles de réunion [indice de confinement dû à l'occupant]). La QAI est liée à de multiples sources (occupants, mobilier, matériaux de construction, etc.) ; On note également que l'air intérieur peut être plus chargé de certains polluants que l'air l'extérieur. L'introduction de fonction d'épuration dans les unités de confort permet de traiter localement les pollutions d'origine intérieure, notamment celles de type particulaire.

→ le confort thermique (ISO 7730) en générant, dans le cas d'un mauvais dimensionnement du système ou mauvais positionnement des bouches, etc., des inconforts locaux (courants d'air, mesurés par l'indice Draught Rate : DR) ou globaux (température d'air en sortie du système de ventilation : risques de sensation trop chaude ou trop froide pour le corps dans son ensemble).

→ le confort acoustique : par des déclenchements intermittents du système de ventilation ou par des vitesses d'air trop importantes augmentant le niveau de bruit. Dans le cas d'une VMC, pour remédier à un bruit de fond de ventilateur, il est possible d'équiper les gaines d'un silencieux venant s'incorporer juste après le ventilateur (attention toutefois, ce système entraîne des pertes de charge non négligeable ...). Pour éviter le sifflement des bouches d'extraction, un réglage de l'installation, le changement des bouches ou leur maintenance (généralement un simple lavage) peut suffire à atténuer le problème.

#### **Climatisation raisonnée**

Si les températures de confort ne peuvent être atteintes sans recours à un système rafraîchissement actif, il conviendra de prendre quelques précautions :

- choix d'une installation performante (ex. PAC avec un coefficient de performance élevé)
- conception et dimensionnement adéquats de l'installation (ballons de stockage, ...)
- dimensionnement approprié
- régulation efficace (température de consigne, GTB,...)

Remarque : réduire la taille de l'installation de climatisation permet également de réduire significativement les coûts.

## Eclairage

Les techniques actives les plus couramment mises en œuvre afin de réduire les consommations d'éclairage en offrant un niveau élevé de confort visuel, sont :

- Installation de sources lumineuses performantes : ex. luminaires fluorescents T5 longue durée de vie & ballast électronique haut rendement
- Commande de l'installation par un système de gestion intelligent : ex. détecteurs de présences, gradation par sondes d'éclairage, différenciation des zones d'allumage (dissociation entre bureaux en premier jour et bureaux éloignés des sources de lumière naturelle), ...

Dans le but de réduire les consommations, et en complément de la mise en œuvre de systèmes performants gérés intelligemment, il est intéressant de réduire la puissance installée en maintenant un bon niveau de confort visuel.

L'installation d'éclairage visera le maintien d'un niveau d'éclairage global de l'ordre de 200Lux (niveau relativement bas) complété par un éclairage ponctuel (de type lampe de bureau) garantissant 400 à 500Lux sur le plan de travail.

Cette solution offre un meilleur confort que les installations actuelles garantissant un éclairage artificiel global de 500Lux (plaintes récurrentes d'occupants depuis plusieurs années vis-à-vis d'un niveau excessif d'éclairage artificiel). La médecine du travail préconise désormais un niveau d'éclairage de 220Lux pour le travail sur écran.

Par la mise en œuvre de cette solution, il est possible de réduire la puissance installée à moins de 10W/m<sup>2</sup> soit une réduction d'environ 50% par rapport aux installations moyennes actuelles.

### 3.2. Techniques dites passives

Outre les techniques actives qui sont plus ou moins énergivores, des techniques passives existent. Ce sont des mesures architecturales et constructives qui permettent d'apporter une solution alternative au confort en consommant peu ou pas d'énergie (ex. : isolation par l'extérieur, stores, ventilation naturelle...).

## Réduire les apports solaires

La principale source de surchauffe étant le soleil et les bâtiments tertiaires ayant des surfaces vitrées très importantes, il est important de se protéger du rayonnement solaire direct. Il existe pour cela de nombreux dispositifs :

- végétation (persistante ou saisonnière)
- protections fixes : casquettes, brise-soleil à lames verticales ou horizontales, débords de toiture, ...
- protections mobiles : stores, volets roulants, volets battants, auvents rétractables, panneaux coulissants, ...
- protections intégrées au vitrage : films, stores entre 2 vitres, traitements de surface, ...

Il est recommandé de placer les protections solaires à l'extérieur afin de limiter les surchauffes (effet de serre).

Les protections fixes présentent l'avantage d'être intégrées architecturalement et de préserver les apports solaires passifs en hiver (lorsque le soleil est bas) si elles sont bien dimensionnées (et ce point est très important). Mais en été, elles ne protègent pas du rayonnement solaire diffus qui peut être conséquent aussi bien en terme de surchauffe que d'éblouissement.

Les protections intégrées au vitrage sont régulièrement controversées ; elles laissent peu de liberté dans leur gestion (par exemple les vitrages électrochromes) et ont tendance à opacifier et donc réduire la quantité de lumière disponible (par exemple les films ou les vitrages réfléchissants ou absorbants).

Les protections mobiles présentent une grande flexibilité pour contrôler les apports solaires et moduler la luminosité intérieure. Elles constituent un système dynamique qui peut donc s'adapter continuellement à l'énergie solaire reçue. Le choix du mode de pilotage a une influence non négligeable sur à la fois le confort et les consommations énergétiques :

- manuel (liberté totale mais l'occupant manque souvent d'anticipation)
- automatique (quels capteurs ? quelle stratégie ? quelle consommation électrique ?)

L'évolution vers un bâtiment « intelligent » (GTB/GTC avancée) qui intègre les conditions climatiques locales, les besoins des occupants, les systèmes CVC et la gestion de l'éclairage semble être la solution des années à venir.

### **Réduire les apports internes**

Les apports internes, notamment électriques, constituent la source principale d'apport d'énergie à l'intérieur des bâtiments de bureaux. Réduire ces apports (réduction des charges thermiques) présente le double avantage de diminuer leur consommation électrique propre et de réduire les consommations de climatisation tout en augmentant le confort.

Il faut noter toutefois qu'en période froide, les apports internes permettent de diminuer la consommation de chauffage.

De façon générale dans les bâtiments tertiaires performants (BBC, BEPOS) qui possède une enveloppe étanche et fortement isolée, on cherchera plutôt à diminuer les charges internes.

Il faut noter que l'éclairage constitue un apport de calories non négligeable dans les bâtiments tertiaires. L'optimisation des systèmes d'éclairage va donc entraîner une baisse conséquente des charges internes (systèmes plus performants dégageant moins de chaleur, régulation efficace, diminution du seuil d'éclairement global).

### **Apporter de l'inertie**

L'inertie, c'est-à-dire le stockage de calories ou de frigories dans un matériau « lourd », permet d'une part un déphasage du pic de température (par exemple entre le jour et la nuit) et d'autre part son amortissement.

L'apport d'inertie dans un bâtiment doit être étudié avec soin en phase amont de la conception (isolation par l'extérieure, cloisons intérieures massives, ...). En effet l'inertie doit être couplée avec un système qui permet de décharger les calories/frigories stockées dans la masse : par exemple par sur-ventilation nocturne pour décharger la chaleur stockée la



journee en été ou en période de chauffe, une dalle inertielle peut par exemple accumuler l'énergie solaire reçue au travers d'une surface vitrée et restituer lentement cette chaleur. L'apport d'une masse inertielle peut également être couplé avec les mises en œuvres architecturales, comme les brise-soleil ou la végétation par exemple qui empêcheront les gains solaires en périodes défavorables. Il faudra aussi veiller à rendre cohérent le niveau d'inertie du bâtiment avec les fluctuations des besoins rencontrées dans les bâtiments de bureau.

En plus de l'inertie, d'autres paramètres liés aux matériaux constructifs et aux revêtements influent le ressenti de l'occupant : la diffusivité et l'effusivité. Ce sont ces paramètres qui font que certains matériaux sont perçus comme « froids » (par exemple les matériaux à forte effusivité : marbre, carrelage, métaux, ...). Les couleurs ont également une influence (couleurs froides vs. couleurs chaudes).

### **Brassage d'air**

De nombreux travaux portant sur le confort d'été montrent qu'il est tout à fait possible d'améliorer la sensation thermique des individus en période chaude, via des techniques simples allant du simple brassage d'air généralisé ou individuel, à des techniques de Personalized Ventilation (PV). Ces solutions permettent d'abaisser la sensation thermique des individus, et/ou d'apporter de l'air « neuf » directement dans les voies respiratoires (améliorant la Qualité de l'Air Perçu (QAP), la performance, et réduisant le syndrome du bâtiment malsain \_SBS\_) [14 ,15].

Un tel procédé (PV) permet d'une part, d'améliorer le confort thermique et la QAP, et d'autre part l'énergie consommée grâce à la dilution de la pollution directement au niveau des voies respiratoires des individus [16].

L'intérêt d'une telle démarche réside dans l'augmentation de la température de consigne en période de climatisation : température intérieure dans le cas de la mise en œuvre d'un système passif - température de consigne du système de climatisation dans le cas d'un système actif. Cette dernière pouvant passer de 26°C à 28°C voire 30°C si l'occupant garde la main sur le brasseur d'air. Par conséquent, l'augmentation de la température de consigne favorise les gains énergétiques pour une classe de confort équivalente.

Les brasseurs d'air pourront être mis en place dans des bâtiments sans système actif de rafraîchissement, ou en complément du système de rafraîchissement existant.

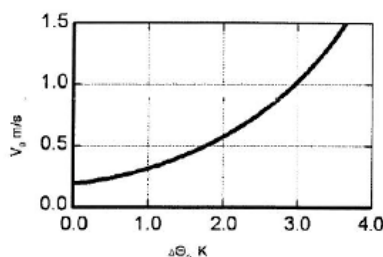
---

<sup>14</sup> Kaczmarczyk J., Melikov A., Sliva D., 2008 – "Avoiding draught discomfort with personalised ventilation used at the low range of comfortable room air temperature", Indoor Air 2008, Paper ID: 1035.

<sup>15</sup> Kaczmarczyk J., Melikov A., P.O Fanger, 2004 \_ "Human response to personalized ventilation and mixing ventilation", indoor air 2004; 14 (suppl 8): 17-29.

<sup>16</sup> Kaczmarczyk J., Melikov A., 2008 – "Impact of air movement on perceived air quality at different pollution level and temperature", Indoor Air 2008, Paper ID: 1033.

Figure 4 : Vitesse d'air requise pour compenser l'augmentation de la température



**Légende**

Δθ<sub>o</sub> Augmentation de la température opérative, K

V<sub>a</sub> Vitesse d'air, m/s

La figure 4 ci-dessus (référence à la norme NF EN 15251) montre qu'une vitesse d'air de 1m/s peut compenser une augmentation de la température opérative de 3 degrés.

*Remarque : la nouvelle norme de confort thermique Américaine (ASHRAE 55-2010) tend à optimiser l'effet de rafraîchissement par l'augmentation des vitesses d'air allant au-delà des premiers travaux mis en exergue par la Brassage d'air*

De nombreux travaux portant sur le confort d'été montrent qu'il est tout à fait possible d'améliorer la sensation thermique des individus en période chaude, via des techniques simples allant du simple brassage d'air généralisé ou individuel, à des techniques de Personalized Ventilation (PV). Ces solutions permettent d'abaisser la sensation thermique des individus, et/ou d'apporter de l'air « neuf » directement dans les voies respiratoires (améliorant la Qualité de l'Air Perçu (QAP), la performance, et réduisant le syndrome du bâtiment malsain \_SBS\_) [ .].

Un tel procédé (PV) permet d'une part, d'améliorer le confort thermique et la QAP, et d'autre part l'énergie consommée grâce à la dilution de la pollution directement au niveau des voies respiratoires des individus [].

L'intérêt d'une telle démarche réside dans l'augmentation de la température de consigne en période de climatisation : température intérieure dans le cas de la mise en œuvre d'un système passif - température de consigne du système de climatisation dans le cas d'un système actif. Cette dernière pouvant passer de 26°C à 28°C voire 30°C si l'occupant garde la main sur le brasseur d'air. Par conséquent, l'augmentation de la température de consigne favorise les gains énergétiques pour une classe de confort équivalente.

Les brasseurs d'air pourront être mis en place dans des bâtiments sans système actif de rafraîchissement, ou en complément du système de rafraîchissement existant.

Cependant, les courants d'air sont généralement plus mal perçus en hiver qu'en été et peuvent entraîner une augmentation de la consigne de chauffage

→ Solution : maîtriser les ouvertures et l'étanchéité de l'enveloppe, maîtrise des vitesses d'air des équipements mécaniques par l'occupant.

- En raison de problèmes d'installation ou de dimensionnement (ex. déclenchement par intermittence, sifflement des bouches), les systèmes CVC peuvent être à l'origine d'une augmentation du niveau sonore dans les espaces intérieurs, pouvant générer un inconfort. Il faut également prêter attention à la transmission des bruits extérieurs en cas de ventilation naturelle...

→ Solution : dimensionnement adéquat, mise en œuvre soignée, régulation optimisée et maintenance régulière.

- **Eclairage naturel**

L'accès à la lumière naturelle de l'occupant dans son espace de travail, est un besoin fondamental pour assurer son bien-être, et impacte fortement sur ses activités. L'éclairage naturel est plus nuancé et variable qu'un éclairage artificiel même performant. Le caractère cyclique de l'éclairage naturel est bénéfique pour l'équilibre psychique de l'occupant, et indispensable pour une bonne perception de l'instant et du lieu dans lequel l'occupant évolue. Outre ce lien vers l'extérieur, les vitrages offrent également une vue lointaine nécessaire au repos de l'œil après une vision rapprochée.

La qualité spectrale de la lumière naturelle assure également la meilleure vision possible des objets et des couleurs. En effet, l'œil humain est naturellement adapté à la lumière naturelle (répartition spectrale identique à la courbe de sensibilité de l'œil). La lumière diurne constitue l'éclairage d'ambiance par excellence.

- **Dispositifs anidoliques et étagères à lumière**

Différents dispositifs, mis en œuvre en façade, permettent une amélioration significative des performances lumineuses dans l'ensemble d'une pièce (facteur de lumière du jour, autonomie en éclairage naturel, etc.) : ce sont des dispositifs anidoliques ou des étagères à lumière qui capte la lumière naturelle pour la diriger vers l'intérieure des locaux. Les stores à lamelles orientables peuvent également jouer ce rôle de capture de lumière, mais également de déflecteur des rayons lumineux vers le plafond pour éviter les éblouissements.

**Par contre on comprend bien que ce système doit interagir avec la régulation de la lumière artificielle, la régulation thermique et les besoins de l'occupant pour trouver le meilleur compromis entre confort visuel et performance thermique.**

*. Ces travaux sont importants car ils allient à la fois confort et performance énergétique.*

## **Eclairage naturel**

L'accès à la lumière naturelle de l'occupant dans son espace de travail, est un besoin fondamental pour assurer son bien-être, et impacte fortement sur ses activités. L'éclairage naturel est plus nuancé et variable qu'un éclairage artificiel même performant. Le caractère cyclique de l'éclairage naturel est bénéfique pour l'équilibre psychique de l'occupant, et indispensable pour une bonne perception de l'instant et du lieu dans lequel l'occupant évolue. Outre ce lien vers l'extérieur, les vitrages offrent également une vue lointaine nécessaire au repos de l'œil après une vision rapprochée.

La qualité spectrale de la lumière naturelle assure également la meilleure vision possible des objets et des couleurs. En effet, l'œil humain est naturellement adapté à la lumière naturelle (répartition spectrale identique à la courbe de sensibilité de l'œil). La lumière diurne constitue l'éclairage d'ambiance par excellence.

L'éclairage naturel est le plus approprié pour l'homme (aspects physiologique et psychologique). Afin d'assurer un confort optimal à l'occupant et des consommations électriques d'éclairage minimums, la source lumineuse principale des espaces de travail doit donc être le soleil. Cependant, du fait de sa variabilité, des moyens d'occultations temporaires et un apport complémentaire d'éclairage artificiel apparaissent nécessaires. L'éclairage artificiel est uniquement considéré comme un complément à la lumière naturelle et s'accorde autant que possible à son spectre lumineux et à ses variations.

Un bon facteur solaire des vitrages, associé à un dispositif de protection solaire (stores intérieurs/ extérieurs, volets ajourés, résille, ...) permettra d'améliorer à la fois le confort d'été et le confort visuel. La mise en place de protections solaires améliore le confort visuel en limitant l'éblouissement des bureaux situés à proximité des fenêtres. De manière générale, la qualité lumineuse lorsque la lumière est indirecte, est très appréciée des usagers des bureaux.

La couleur des surfaces (sol, mur, plafond) et des stores (les couleurs claires sont réfléchissantes et absorbent moins la chaleur ; les couleurs sombres diminuent les reflets et les risques d'éblouissement), joue également un rôle dans l'efficacité énergétique de la construction et du point de vue du confort visuel.

### Dispositifs anidoliques et étagères à lumière

Différents dispositifs, mis en œuvre en façade, permettent une amélioration significative des performances lumineuses dans l'ensemble d'une pièce (facteur de lumière du jour, autonomie en éclairage naturel, etc.) : ce sont des dispositifs anidoliques ou des étagères à lumière (voir figures 5 et 6)

Figure 5 : Principe de l'éclairage anidolique : une partie de la lumière frappant la façade est renvoyée vers l'arrière de la pièce par un jeu de miroirs de forme particulièrement étudiée.

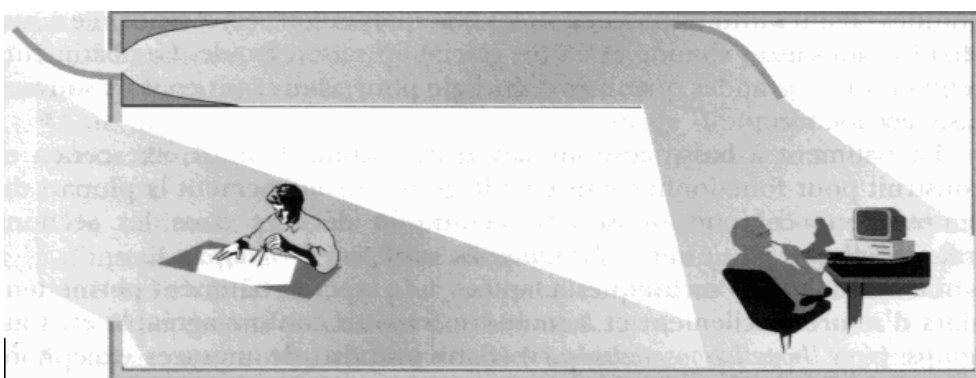
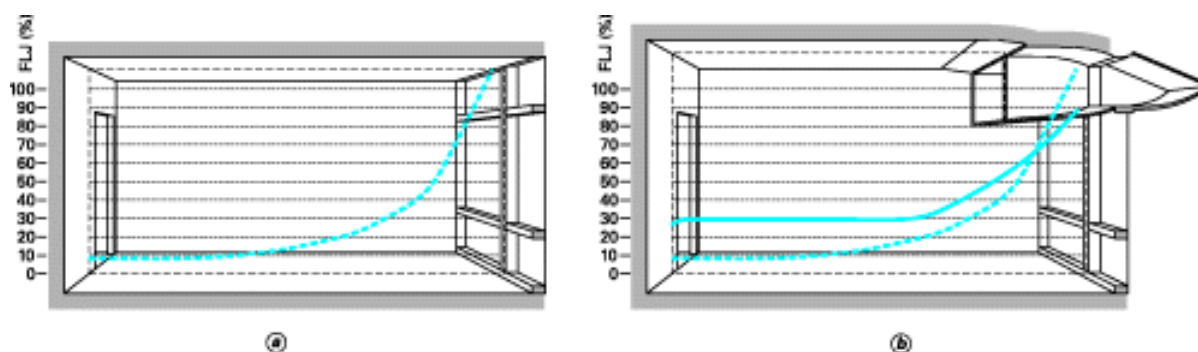


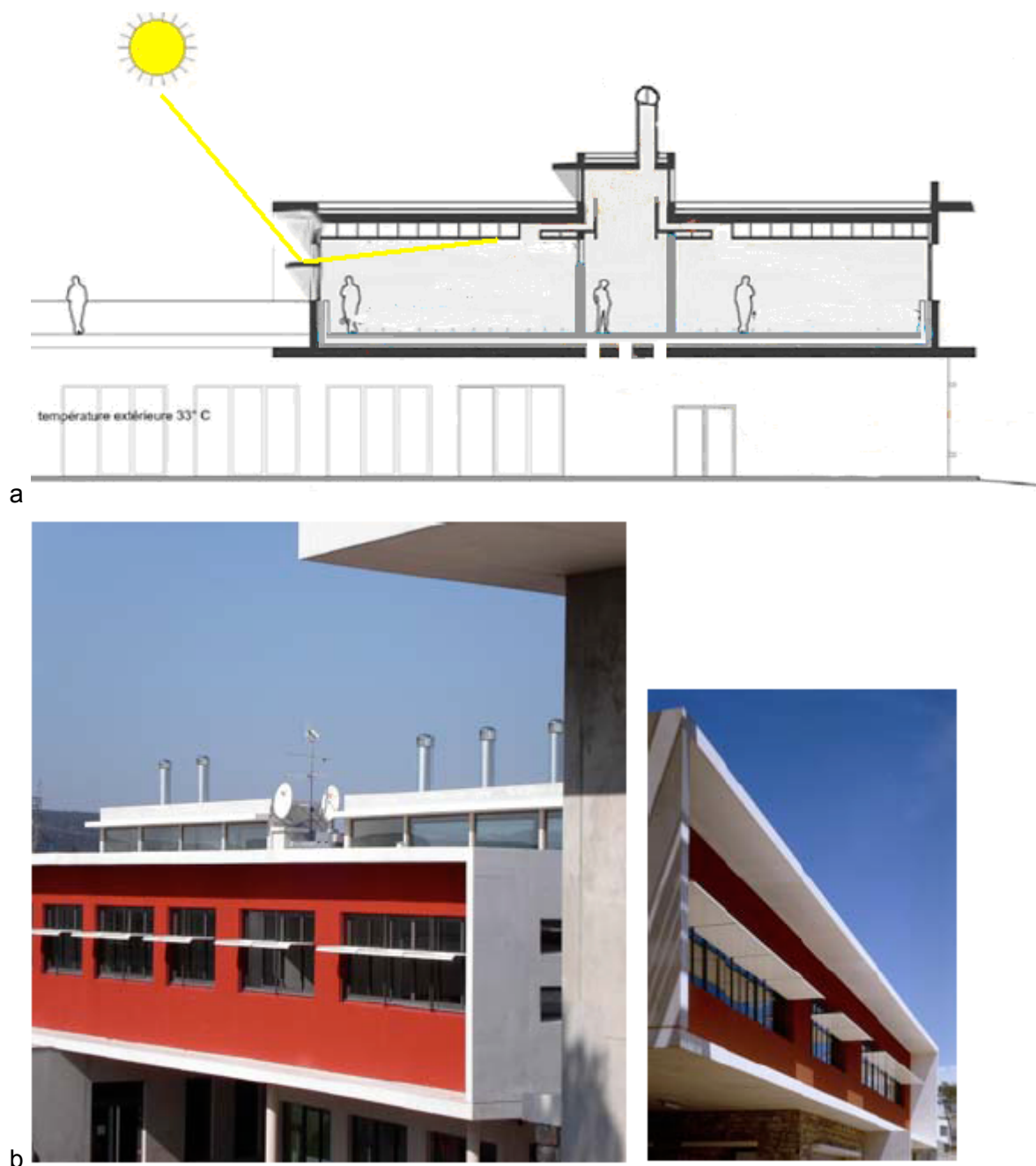
Figure 6 : Représentation schématique d'un réflecteur anidolique (b) par rapport à une référence (a). Source : Techniques de l'ingénieur "Dispositifs d'éclairage naturel" – Référence C3316 – Publication 10/02/2008.



Les étagères à lumière sont fixes, mises en œuvre horizontalement en façade avec un coefficient de réflexion élevé. Ce dispositif simple permet une meilleure diffusion de la lumière naturelle et protège également des surchauffes estivales (voir figure 7 ci-dessous).

Les dispositifs anidoliques, basés sur les principes de l'optique anidolique, ont pour propriété d'accroître de façon substantielle la pénétration de la lumière naturelle, et permettent ainsi d'obtenir le doublement du facteur de lumière du jour à plus de 5 mètres de la façade, par comparaison à une façade conventionnelle munie d'un double vitrage isolant.

Figure 7 (a et b) : Principe de fonctionnement des étagères à lumière – Lycée Jean JAURES, Saint Clément de Rivière.



L'augmentation des performances lumineuses d'une pièce par ces deux types de dispositifs est attribuable à la pénétration plus importante du flux de lumière naturelle vers l'arrière du local, obtenue grâce à l'élément principal du dispositif : un déviateur de lumière naturelle dit déviateur anidolique pour les dispositifs anidoliques, et une « tablette » pour les étagères à lumière.

Une amélioration du confort visuel, due à un meilleur équilibre des luminances, est également observée.

#### 4. Synthèse et recommandations

- Les gradients de température (par exemple la sensation de « pieds froids ») entraînent le plus souvent une augmentation de la consigne de température par l'utilisateur = augmentation de la facture énergétique  
→ Solution : en premier lieu assurer une bonne isolation des dalles de sol en contact avec l'extérieur ; puis mettre en place un brassage d'air adapté, un système assurant l'homogénéité thermique ou un système actif ponctuel complémentaire.
- Les courants d'air sont généralement plus mal perçus en hiver qu'en été et peuvent entraîner une augmentation de la consigne de chauffage  
→ Solution : maîtriser les ouvertures et l'étanchéité de l'enveloppe, éviter les vitesses d'air trop élevées.
- A confort égal en période de surchauffe, il est possible d'augmenter la température de consigne de climatisation de quelques degrés en augmentant légèrement la vitesse d'air soufflé.  
→ Solution : favoriser le brassage d'air, adapter les débits de ventilation et penser aux bouches de soufflage dès la conception.
- Afin d'éviter les surchauffes, respecter le tryptique : se protéger du rayonnement solaire, réduire les charges internes, dissiper les calories.
- La protection solaire optimale favorise l'éclairage naturel tout en évitant les éblouissements et limite les apports solaires excessifs qui entraînent des surchauffes. Attention aux protections fixes car la course du soleil évolue en chaque instant et diffère beaucoup entre les saisons.  
Attention aux protections opaques qui une fois complètement fermées nécessite un éclairage artificiel.  
→ Solution : multiplier les protections ; par exemple coupler un brise-soleil fixe à lames horizontales sur l'enveloppe (protège du flux solaire direct en été) avec un store intérieur semi-opaque (régule la quantité de lumière et évite les éblouissements en hiver lorsque le soleil est bas dans le ciel)
- En raison de problèmes d'installation ou de dimensionnement (ex. déclenchement par intermittence, sifflement des bouches), les systèmes CVC peuvent être à l'origine d'une augmentation du niveau sonore dans les espaces intérieurs, pouvant générer un inconfort. Il faut également prêter attention à la transmission des bruits extérieurs en cas de ventilation naturelle...  
→ Solution : dimensionnement adéquat, mise en œuvre soignée, régulation optimisée et maintenance régulière.
- De façon générale, laisser à l'utilisateur la possibilité d'agir sur son environnement direct augmente la tolérance de celui-ci aux inconforts légers.

## 6.2 Annexe Qualité d'Air Intérieur (QAI)

### 1- Définition du critère de confort QAI

Cette définition concerne la Qualité de l'Air Intérieur en général et dans un bâtiment de bureaux en particulier.

La Qualité de l'Air Intérieur ne se définit pas par un critère unique mais plutôt par un ensemble de critères relatifs aux différentes natures des sources de pollutions présentes au sein des locaux. Les trois types de pollutions de l'air intérieur sont :

- la pollution particulaire ;
- la pollution chimique ;
- la pollution microbiologique.

Compte tenu des environnements traités par ce document, les bureaux, nous avons choisi dans un premier temps de ne pas donner de critères relatifs aux pollutions microbiologiques.

La Qualité de l'Air Intérieur sera donc exprimée par des seuils limites à ne pas dépasser de concentration en particules ou en espèces chimiques.

La liste des polluants impactant sur la santé humaine retenue dans le cas précis d'un bâtiment de bureaux est issue des recommandations de l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) qui a publié des valeurs guides de qualité d'air intérieur pour différents polluants.

- Polluants particulaires : PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> ;
- Polluants chimiques : Formaldéhyde, Benzène, Naphtalène, Trichloréthylène, Tétrachloréthylène, Toluène.

La concentration en CO<sub>2</sub> est aussi un critère important à retenir car il est directement lié à l'occupation humaine.

### 2- Niveaux réglementaires et normatifs – Valeurs guides

#### 2.1 Normes traitant de la qualité de l'air intérieur

- NF EN 15251, « *Critères d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique* », Août 2007

Cette norme européenne a été créée lors des travaux de normalisation qui ont accompagné la mise en place de la première Directive Européenne sur la Performance Energétique des Bâtiments de 2005. Elle définit des critères d'environnement intérieur concernant le confort thermique, le confort visuel, le confort acoustique et la qualité de l'air intérieur, afin que la conception des bâtiments ne soit pas exclusivement régie par des considérations énergétiques. L'objectif est d'éviter qu'un souci excessif d'économie d'énergie engendre des bâtiments avec des niveaux de confort et de qualité de l'air médiocres, voire insatisfaisants. Ces conditions peuvent en effet avoir des conséquences néfastes sur le bien être et la santé des occupants. Dans le cas des bâtiments de bureaux, cela impacte l'efficacité et le taux d'absentéisme des collaborateurs. Les aspects traités dans cette norme relatifs à la qualité de l'air intérieur sont :

- l'excès de la concentration en CO<sub>2</sub> par rapport à la concentration extérieure;

- la concentration en particules ;
  - la dilution par le niveau de débit d'air neuf (air extérieur) insufflé.
- NF EN ISO 16814 : « *Conception de l'environnement des bâtiments -- Qualité de l'air intérieur -- Méthodes d'expression de la qualité de l'air intérieur pour une occupation humaine* », octobre 2008.

Cette norme définit une démarche de conception pour permettre de prendre en compte l'ensemble des éléments qui peuvent impacter la qualité de l'air intérieur. Ces éléments sont principalement liés à la nature de l'environnement extérieur, au type d'usage et à l'occupation. Trois méthodes différentes sont proposées pour définir les critères de qualité d'air intérieur :

- une méthode basée sur des concentrations limites de polluants fixées par rapport à un risque sanitaire. Dans ce cas, c'est en fonction d'une valeur cible de concentration maximum à ne pas dépasser, de l'intensité des sources en présence dans l'environnement intérieur et des concentrations dans l'air extérieur que seront définis les débits de ventilation et les moyens éventuels d'épuration ;
- une méthode basée sur le ressenti des occupants, lié au confort olfactif. Un critère souvent retenu pour établir des niveaux de confort olfactif est la concentration en CO<sub>2</sub> car elle est directement liée à l'occupation humaine et donc au niveau des bio effluents.
- une méthode basée sur un taux de ventilation des locaux. Une dilution plus ou moins élevée des pollutions intérieures est obtenue en jouant sur le niveau des débits de ventilation. Les débits de ventilation sont fixés a priori et prennent en compte les polluants liés à l'occupation humaine et les polluants liés au bâtiment et à ses équipements (mobilier).

## 2.2 Textes réglementaires

Pour les bâtiments de bureaux la réglementation française en vigueur traite la qualité de l'air intérieur soit en définissant des débits de ventilation, soit des cibles de concentrations en CO<sub>2</sub>. Les deux textes réglementaires qui s'appliquent sont le Code du travail et le Règlement Sanitaire Départemental Type (RSDT).

## 2.3 Valeurs guides

Le tableau ci-après regroupe les valeurs guides éditées par l'ANSES pour les polluants chimiques et particulaires et le niveau de concentration en CO<sub>2</sub> donné par le RSDT.

Les valeurs des concentrations proposées par l'ANSES dépendent des durées d'exposition.

Polluants	ANSES	RSDT
CO2		1300 ppm
Formaldéhyde sur 2 h Formaldéhyde sur long terme, 1 an	50 µg/m <sup>3</sup> <b>10 µg/m<sup>3</sup></b>	
Benzène, court terme 1 à 14 jours	30 µg/m <sup>3</sup>	
Benzène, moyen terme de 2 semaines à 1 an	20 µg/m <sup>3</sup>	



Benzène, long terme, supérieur à 1 an	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Benzène, vie entière	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour un excès de risque de $10^{-5}$ 0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour un excès de risque de $10^{-6}$	
Naphtalène, long terme, supérieur à 1 an	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Trichloréthylène, moyen terme 2 semaines à 1 an	800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Trichloréthylène, long terme, supérieur à 1 an	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour un excès de risque de $10^{-5}$ 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour un excès de risque de $10^{-6}$	
Tétrachloréthylène (Perchloroéthylène) long terme, 1 à 2 semaines	1380 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Tétrachloréthylène (Perchloroéthylène) long terme, >1 an	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Toluène sur 8 heures	10 $\text{mg}/\text{m}^3$	
Toluène sur 1 heure	30 $\text{mg}/\text{m}^3$	
Toluène sur 30 mn	60 $\text{mg}/\text{m}^3$	
Toluène sur 15 mn	100 $\text{mg}/\text{m}^3$	
Particules		
PM <sub>10</sub> , sur 24h	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
PM <sub>10</sub> , sur long terme	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
PM <sub>2.5</sub> , sur 24h	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
PM <sub>2.5</sub> , sur long terme	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

## 2.4 - Critères QAI repris par les labellisations environnementales du bâtiment

### 2.4.1- Label LEED : Leadership in Energy and Environmental Design

Le LEED fonctionne en points. Au total 110 points peuvent être collectés.

Le barème de certification des bâtiments est le suivant :

- de 40 à 49 certifiés
- de 50 à 59 certifiés Silver (Argent)
- de 60 à 79 certifiés Gold (Or)
- de 80 et + certifiés Platinum (Platine)

Les critères de qualité d'air intérieur sont répertoriés dans le chapitre « qualité des environnements intérieurs » qui a une potentialité globale de 15 points. Néanmoins les critères de QAI à proprement parler ne permettent de collecter que 9 points. Soit 23% d'une certification de base, 18% d'une certification Silver, 15% d'une certification Or et 11% d'une certification Platinum.

On trouve d'abord 2 « prérequis » de base, qui sont nécessaires pour l'obtention de la certification

- Prerequis 1 Performance minimum de la QAI assurée par le respect de la norme ASHRAE 62.1-2007 qui précise les critères de conception de la ventilation mécanique ou naturelle

- Prerequis 2 Contrôle des fumées de tabac. Ce critère est sans objet en France.

- Crédit 1 (1 point) : Contrôle du CO<sub>2</sub>

Mesure et monitoring de la concentration CO<sub>2</sub> dans les zones à forte occupation (au moins 1 personne pour 3,7 m<sup>2</sup>)

Mesure du débit d'air neuf entrant avec une précision maxi de 15%.

Action corrective sur système HVAC souhaitée. Si le contrôle automatique du débit d'air neuf n'est pas possible en regard de la conception du système, une alarme d'information de déficience du débit d'air neuf.

- Crédit 2 (1 point) : Efficacité de la ventilation

Amélioration de la qualité d'air intérieur par augmentation du débit d'air neuf (30% par rapport au minimum requis par la norme ASHRAE 62.1-2007. La preuve de la quantité d'air neuf par zone devra être apportée grâce à une modélisation, pour au moins 90 % des espaces occupés. L'utilisation de récupérateurs de chaleur sur les Centrales de Traitement d'Air neuf est imposée.

En commentaire on peut préciser que

- l'efficacité de la récupération d'énergie doit être analysée de manière globale, en tenant compte du bilan entre l'énergie thermique effectivement récupérée et l'énergie électrique supplémentaire consommée à cause de l'augmentation des pertes de charge sur l'air dues au récupérateur (un récupérateur avec moins d'efficacité, mais des pertes de charge aérodynamiques limitées a souvent une meilleure efficacité énergétique annualisée qu'un échangeur possédant une efficacité de récupération plus élevée).
- Les CTA d'air neuf doivent être dimensionnées afin que leur performance énergétique soit optimisée (grande section, rendement des ventilateurs et des moteurs, filtres à faibles pertes de charge, ...).

- Crédit 3.1 (1point) Plan de gestion de la qualité de l'air - pendant la construction

La qualité d'air sera contrôlée durant le chantier. L'objectif est de garantir confort et bien-être aux ouvriers comme aux futurs occupants, ainsi que de réduire les problèmes sanitaires dus à une mauvaise qualité d'air, liée à la construction ou à la rénovation.

Les matériaux absorbants seront protégés des dégradations dues à l'humidité.

Si des centrales d'air sont implantées durant la phase chantier, une protection par filtration est requise. Cette filtration devra être remplacée avant occupation du bâtiment

- Crédit 3.2 (1 point)  
1 Plan de gestion de la qualité de l'air – analyse avant l'occupation

L'objectif est de garantir confort et bien-être aux ouvriers comme aux futurs occupants, ainsi que de réduire les problèmes sanitaires liés à une mauvaise qualité d'air, liée à la construction ou à la rénovation.

Remplacement des systèmes de filtration après la fin du chantier. Une séquence de sur-ventilation sera opérée afin de diluer les polluants présents.

Contrôle de la pollution :

Demonstrate that the contaminant maximum concentration levels listed below are not exceeded:

Contaminant	Maximum Concentration
Formaldehyde	27 parts per billion
Particulates (PM10)	50 micrograms per cubic meter
Total volatile organic compounds (TVOCs)	500 micrograms per cubic meter
4-Phenylcyclohexene (4-PCH)*	6.5 micrograms per cubic meter
Carbon monoxide (CO)	9 part per million and no greater than 2 parts per million above outdoor levels
* This test is only required if carpets and fabrics with styrene butadiene rubber (SBR) latex backing are installed as part of the base building systems.	

- Crédit 4.1 (1 point) : Matériaux à faibles émissions – adhésifs et produits d'étanchéité

Architectural Applications	VOC Limit (g/L less water)	Specialty Applications	VOC Limit (g/L less water)
Indoor carpet adhesives	50	PVC welding	510
Carpet pad adhesives	50	CPVC welding	490
Wood flooring adhesives	100	ABS welding	325
Rubber floor adhesives	60	Plastic cement welding	250
Subfloor adhesives	50	Adhesive primer for plastic	550
Ceramic tile adhesives	65	Contact adhesive	80
VCT and asphalt adhesives	50	Special purpose contact adhesive	250
Drywall and panel adhesives	50	Structural wood member adhesive	140
Cove base adhesives	50	Sheet applied rubber lining operations	850
Multipurpose construction adhesives	70	Top and trim adhesive	250
Structural glazing adhesives	100		
Substrate Specific Applications	VOC Limit (g/L less water)	Sealants	VOC Limit (g/L less water)
Metal to metal	30	Architectural	250
Plastic foams	50	Roadway	250
Porous material (except wood)	50	Other	420
Wood	30		
Fiberglass	80		
Sealant Primers	VOC Limit (g/L less water)		
Architectural, nonporous	250		
Architectural, porous	775		
Other	750		
This table excludes adhesives and sealants integral to the water-proofing system or that are not building related.			

- Crédit 4.2 (1 point) Matériaux à faibles émissions – Peintures et enduits

Limites imposées en teneur COV des peintures (valeurs normatives)

- Crédit 4.3 (1 point) Matériaux à faibles émissions – Tapis  
Qualité des revêtements de sols et colles utilisées requise en respect des normes.

- Crédit 4.4 (1 point) Matériaux à faibles émissions – bois stratifié  
Résines de formaldéhydes prohibées dans ce type de matériaux.

- Crédit 5 (1 point) Contrôle des produits chimiques et des sources de pollution

L'objectif est de minimiser l'exposition des occupants aux polluants chimiques et particulaires  
Un renforcement de la filtration est préconisé, allié à une gestion éventuelle de la suppression/dépression de certains locaux afin de confiner les sources particulières de pollution.

## 2.4.2- Label BREEAM: Building Research Establishment Environmental Assessment Method

BREEAM comptabilise des points permettant de hiérarchiser la classification

Table 1: BREEAM 2008 rating benchmarks

BREEAM Rating	% score
UNCLASSIFIED	<30
PASS	≥30
GOOD	≥45
V GOOD	≥55
EXCELLENT	≥70
OUTSTANDING*	≥85

Les cibles impactant la QAI sont regroupées dans la section «Santé et Bien-être ».

- **HEA 8 : Qualité d'air intérieur**
- **HEA 9 : Composés Organiques volatiles**
- **HEA 12 : Contamination microbiologique**

- **HEA 8 : Qualité d'air intérieur**

Dans cette cible, l'air extérieur est clairement défini comme étant la solution d'amélioration de la qualité d'air intérieur. Une préconisation de positionnement de prise d'air neuf à 10m mini de points d'extraction et à 20m de toute autre source de pollution extérieure. Les sources de pollution extérieure étant répertoriées comme étant :

- Autoroutes et voies principales d'accès au site certifié
- Parkings
- Extractions d'autres bâtiments

Il est précisé que la filtration n'est pas considérée comme une garantie de protection contre les pollutions extérieures définies et que l'on ne peut s'affranchir des distances à respecter entre les prises d'air neuf et les sources de pollution extérieure.

Les débits d'air neuf doivent respecter la valeur de 12 l/s/personne (43 m<sup>3</sup>/h/personne) pour les bâtiments de bureau.

Un crédit de 1 point est attribué à cette cible HEA 8.

- **HEA 9 : Composés organiques volatils**

Le but est de promouvoir un environnement interne sain grâce à l'utilisation de matériaux de finition et d'équipements à basses émissions de COV.

Un crédit de 1 point est attribué si la preuve est faite que les émissions de COV et d'autres substances des finitions principales et équipements sont conformes aux meilleures valeurs guide.

Le mobilier n'est pas concerné par la réflexion de cette cible.

- **HEA 12 : Contamination microbologique**

Le but est ici de s'assurer que la conception intègre la diminution du risque de contamination par légionelles en exploitation du bâtiment, et ce par les vecteurs air et eau (crédit de 1 point attribué)

Sont concernés les systèmes à eau risquant une aérosolisation de l'eau dans l'air ambiant. Les risques majeurs concernent les tours de refroidissement évaporatives et la distribution de l'eau froide et chaude sanitaire. Ces deux applications ne concernent pas le bâtiment de bureaux, cible du présent document.

## 2.4.3- Label HQE

Les cibles du référentiel HQE concernées par la Qualité de l'air intérieur sont les suivantes :

- Cible 2 : Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction
- Cible 11 : Garantie d'une ventilation efficace, Maitrise des sources d'odeurs désagréables
  - **Contrôle CO<sub>2</sub> par pièce**
  - **Ventilation naturelle en Base seulement (acoustique, QAI)**
- Cible 12 : Qualité sanitaire des espaces
  - **Qualité de la ventilation**
- Cible 13 : Qualité sanitaire de l'air
  - **Garantie d'une ventilation efficace**
  - **Maitrise des sources de pollutions**

### Cible 13 :

La cible 13 est la plus importante en regard de la problématique de la QAI.

L'évaluation de la performance du bâtiment de bureau ou d'enseignement sur cette cible se fait de la manière suivante :

<b>CIBLE 13</b>	<b>EVALUATION</b>
<b>BASE</b>	<b>Toutes les préoccupations niveau B satisfaites</b>
<b>PERFORMANT</b>	<b>Toutes les préoccupations niveau B et P satisfaites</b>
<b>TRES PERFORMANT</b>	<b>Toutes les préoccupations niveau B et P satisfaites</b> + <b>12 POINTS en cas de risque radon identifié</b> <b>10 POINTS en cas d'absence de risque radon</b>  dont <b>• 2 POINTS sur la préoccupation 13.2.5 (exigence marquée de deux astérisques)</b>
	<b>NOMBRE DE POINTS DISPONIBLES SUR LA CIBLE</b>
	<b>35</b>

**Sous-cible 13.1 : Garantie d'une ventilation efficace**

**Critère 13.1.1. : Assurer des débits d'air adaptés à l'activité de locaux**

Il est spécifié ici d'assurer des débits d'air adaptés à l'activité des locaux, par la mise en œuvre d'un système de ventilation spécifique. Si une ventilation naturelle non contrôlée est envisagée, une ventilation mécanique complémentaire doit être prévue.

Il est demandé de justifier l'atteinte des débits d'air hygiéniques réglementaires, et que ces débits soient optimisés pour l'activité des locaux (optimisation nécessaire pour l'atteinte du niveau Performant).

En outre, l'identification des espaces où il est pertinent d'asservir les débits d'air et les dispositions prises pour cela permettent d'atteindre le niveau TP de la sous-cible et de récolter 4 points.

L'obtention du niveau TP sur ce critère passe par l'intégration d'un système de régulation du débit d'air neuf par pièce grâce à des capteurs de CO2 permettant un débit proportionnel dans chaque pièce en fonction du besoin réel lié à l'occupation de celle-ci. La régulation proportionnelle sur concentration CO2 étant particulièrement judicieuse dans les bureaux paysagés et salles de réunion, dans lesquels la fluctuation du taux d'occupation est importante. Dans les bureaux individuels, une détection de présence pourra suffire pour asservir l'amenée d'air neuf au débit nominal. Le débit d'air neuf global traité par la ou les centrales de traitement d'air neuf, sera asservi à une sonde de pression en gaine, qui garantira ainsi le bon débit pour chaque locaux.

**Critère 13.1.2. : Eviter les déperditions d'air**

Ce critère spécifie des niveaux d'étanchéité des réseaux aérauliques, 'à minima' classes A, B ou C pour l'obtention respective du niveau B, P ou TP (avec l'obtention de 2 points sur le niveau TP). En complément d'information, on peut indiquer que ces classes d'étanchéité sont régies par les normes d'essais EN 12237 et EN 15107, respectivement pour les conduits circulaires et rectangulaires.

**Critère 13.1.3. : Assurer la maîtrise de la qualité d'air amené par conduit :**

Des dispositions satisfaisantes pour la qualité de l'air amené dans les espaces en fonction de l'usage et de la qualité de l'air extérieur, permettront d'atteindre un niveau P sur ce critère.

Il est évident qu'un soin particulier au niveau de la performance de la filtration de l'air extérieur devra être apporté.

**Critère 13.1.4. : Assurer une atmosphère saine dans les espaces**

Ce qui est souhaité par ce critère consiste au redémarrage de la ventilation avant la période d'occupation. Un pilotage automatique de l'installation est donc ici requis.

L'obtention du niveau TP (1 point) est régi par l'assurance de la propreté des réseaux de ventilation avant la mise en service de l'installation.

**Critère 13.1.5. : Assurer un balayage optimal de l'air intérieur dans les espaces**

Une réflexion justifiée doit être menée sur le positionnement des bouches (soufflage comme extraction) pour l'obtention du niveau B de ce critère. On peut étendre cette prescription en insistant sur l'impact sur ce critère de bouches possédant une grande qualité de diffusion (forte induction et effet coanda par exemple)

La réalisation d'une étude aéraulique sera nécessaire pour l'obtention du niveau TP (3 points). L'objectif étant toujours d'arriver à un balayage optimal de l'air des espaces.

Un commentaire est appelé par ce critère. Un balayage optimal de l'espace des bureaux, associé à une filtration efficace intégrée dans les unités de confort,

**Sous-cible 13.2 : Maitrise des sources de pollution internes****Critère 13.2.1. : Identifier et réduire les effets des sources de pollution internes****Critère 13.2.2. : Connaître les émissions de fibres et de particules des produits en contact avec l'air****Critère 13.2.3 : Limiter la pollution par les éventuels traitement des bois****Critère 13.2.4. : Prévenir le développement des bactéries dans l'air**

Identification des sources et dispositions prises pour prévenir ce risque.

Ce critère indique les systèmes de climatisation (hors tours aéroréfrigérantes) comme étant source de contamination principale. Néanmoins, il est important de signaler qu'au niveau des systèmes de refroidissement, seules les tours de refroidissements évaporatives peuvent être mises en cause dans des contaminations avérées. L'autre source dans le bâtiment étant l'eau sanitaire (froide et chaude).

L'implantation d'une filtration adaptée permet une diminution de la charge bactérienne potentiellement présente dans l'air, et ainsi d'atteindre les 3 points attribués au niveau TP sur ce critère.

**13.2.5. : Connaître l'impact sanitaire des produits de construction vis-à-vis de la qualité d'air intérieure**

Le premier niveau de ce critère consiste à connaître les émissions de COV des matériaux.

En TP, 100% des surfaces en contact de l'air intérieur doivent être connues (2 points).

En TP des seuils à respecter (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) concernant l'ensemble des produits et matériaux constituant les surfaces permettent d'atteindre un niveau TP plus complet avec des points comptabilisables :

- TVOC (composés organiques volatils totaux) : 1 à 2 points
- Formaldéhyde : 1 à 4 points
- Cancérogènes 1 et 2 : 1 à 3 points

En TP, la connaissance brute des émissions de substances CMR 1 et 2 permet de gagner 2 points supplémentaires.

Pour remplir au mieux les critères en niveau TP, une quantification précise du relargage des matériaux et produits en contact avec l'air intérieur doit être fournie par les intégrateurs des produits et matériaux.

**13.2.6. : Choisir les produits de construction pour limiter les impacts sanitaires de l'ouvrage****Sous-cible 13.3 : Maitrise des sources de pollution externes****Critère 13.3.1. : Identifier les sources de pollution externes**

Identification des pollutions extérieures (en tenant compte des risques liés aux pollutions du sol)

**Critère 13.3.2. : Limiter l'entrée des polluants externes identifiés**

En fonction des pollutions identifiées au 13.3.1, les dispositions doivent être prises pour limiter l'entrée des polluants dans le bâtiment.

En commentaire, on peut considérer que cette prescription nécessaire pour atteindre le niveau de base (B), contre-indique la ventilation naturelle n environnement à pollution extérieure identifiée.

**Critère 13.3.3. : Assurer la maitrise des pollutions**

Cette cible ne peut être retenue que pour le risque radon « identifié ».des niveaux cible de concentration permettent d'atteindre les niveaux B, P et TP (avec 2 points potentiels à la clef).

A noter que l'origine du radon étant tellurique, la captation d'air à proximité de la surface du sol, ou intégrant des réseaux aérauliques enterrés insuffisamment étanches sont contre-indiqués pour l'atteinte des niveaux performants (P) ou très performants (TP). 2 points sont attribuables en TP.



## **Cible 2 :**

Les préoccupations de la sous-cible 2.4 (choix des produits de construction afin de limiter les impacts sanitaires) ont une approche très similaire à la sous-cible 13.2 Maîtrise des sources de pollutions internes.

## **Cible 11 :**

La sous-cible 11.1 (Garantie d'une ventilation efficace) à une structure équivalente à la sous-cible 13.1

La sous-cible 11.2 (Maîtrise des sources d'odeurs désagréables et création d'une ambiance olfactive agréable) spécifie les préoccupations suivantes :

- 11.2.1 – Identifier et réduire les effets des sources d'odeurs
  - Ce point demande d'identifier les sources d'odeur tout au long du projet et de prendre des mesures qualifiées pour réduire l'impact (niveau B).
  - La mise en dépression des espaces émetteurs permet d'atteindre le niveau P. La sectorisation des espaces et l'éloignement des sources permet d'atteindre le niveau TP (attribution d'un point)
- 11.2.2 – Traiter les rejets malodorants pour éviter la diffusion des odeurs (3 points en TP)
  - Le traitement peut se régler par des systèmes de ventilation adaptés (extractions, éventuellement filtration moléculaire en recyclage)
- 11.2.3 – Assurer une ambiance olfactive agréable dans les espaces (1 point en TP)
  - Les spécifications de cette préoccupations restent très générales

## **Cible 12 :**

### ➤ **Sous-cible 12.1 - Limitation de l'exposition électromagnétique**

- Préoccupation 12.1.1 : Identifier les sources d'émissions électromagnétiques
  - Cette préoccupation vise l'identification des sources « énergie » et « télécoms »
  - Il est également demandé un bilan de puissance prévisionnel du matériel « énergies » et pour, la partie « télécoms », une estimation du champ électromagnétique ambiant et la contribution du projet à l'exposition globale.
- Préoccupation 12.1.2. – Limiter l'impact des sources d'émission électromécanique (3 points en TP)
  - Dispositions justifiées pour limiter l'impact
  - Commentaire : Pour la partie énergie, la limitation de la puissance installée est certainement la mesure principale sur cette problématique. On rejoint là l'impact d'optimisation énergétique des systèmes, qui a donc également un rôle actif d'amélioration de la QAI.

### ➤ **Sous-cible 12.2 Création des conditions d'hygiène spécifique**

- Préoccupation 12.2.4. – Choisir des matériaux limitant la croissance fongique et bactérienne
  - Cette préoccupation concerne bien les locaux à conditions d'hygiène spécifique nécessitant des nettoyages fréquents (niveau B)
  - Si pour tous les autres locaux, est appliqué la même règle pour 50 ou 80 % des surfaces couvertes, obtention respectivement des niveaux P ou TP (5 points attribué en TP)

En conclusion, on constate que le référentiel HQE intègre les critères de qualité d'air intérieur. Néanmoins pour que l'analyse soit pertinente il faut que les cibles concernées et précitées soient choisies en niveau TP. L'effort doit être mené pour que les profils environnementaux des bâtiments intègrent cette prérogative forte.

### 3- Niveau consensuel

Ce point ne sera pas abordé car la QAI n'est pas un critère « ressenti ».

### 4- Mesures et contrôles

Compte tenu de l'intermittence des sources de pollutions internes et des variations des conditions extérieures, il est important de pouvoir effectuer un suivi des pollutions afin d'adapter les solutions de traitement d'air et de pouvoir valider si les valeurs cibles de concentration maximum sont respectées.

Pour permettre de suivre les indicateurs exposés dans le paragraphe 2, les types de capteurs à mettre en place sont :

- des capteurs CO<sub>2</sub> ;
- des capteurs particulaires ;
- des capteurs de polluants chimiques, soit spécifiques à une espèce, soit sensibles à plusieurs espèces.

Ces capteurs doivent être positionnés de façon à pouvoir surveiller la qualité de l'air intérieur et aussi, suivant les risques de pollutions extérieures, l'air neuf introduit dans les bâtiments.

A ce jour, les capteurs les plus répandus sur le marché sont les capteurs CO<sub>2</sub>. Ils sont suffisamment robustes et précis pour suivre les évolutions des concentrations dans l'air intérieur des bâtiments de bureaux. Leur durée de vie moyenne est de plusieurs années et leur prix, compte tenu du développement du marché, est de plus en plus abordable. Ces capteurs sont essentiellement utilisés pour piloter le niveau de renouvellement d'air des locaux. Ils sont surtout utilisés dans les locaux dont le taux d'occupation est très variable comme les salles de réunion.

Des capteurs de polluants chimiques existent aussi, mais ils demeurent encore insuffisamment précis et fiables. Ils ont tendance à dériver dans le temps. Ces capteurs sont surtout des capteurs globaux, sensibles à plusieurs espèces.

En ce qui concerne l'offre de capteurs particulaires, elle est encore plus restreinte que celle des capteurs de polluants chimiques. Il demeure actuellement difficile de trouver un capteur fiable adapté aux contraintes techniques et économiques de la surveillance de la concentration particulaire dans les bâtiments de bureaux.

Néanmoins, vu les enjeux importants liés à la surveillance de la qualité de l'air, des efforts importants sont consacrés à la recherche et au développement de nouvelles générations de capteurs. Les futurs capteurs de polluants chimiques permettront de faire un suivi de la concentration de polluants chimiques ciblés. Des nouveaux capteurs particuliers de taille réduite et suffisamment précis et fiables devraient aussi prochainement arriver sur le marché.

### 5- Origine des polluants

#### 5.1- Les occupants

Les personnes présentes dans les locaux sont soit directement, soit par leurs activités des sources d'émission de polluants. Parmi ces pollutions on peut retenir principalement :

- les particules présentes sur les surfaces (meubles, sols, vêtements) mises en suspension par les mouvements et déplacements des occupants ;
- les odeurs corporelles ;

- les polluants chimiques et les particules liés aux produits cosmétiques, aux émissions des appareils de bureautique (ordinateurs, imprimantes, photocopieur);
- les polluants chimiques liés aux produits d'entretiens ;
- les polluants microbiologiques tels que les bactéries, les virus, les champignons, les moisissures, les squames.

## 5.2- L'air extérieur

Les pollutions présentes dans l'air extérieur sont de types particulaires (inertes ou biologiques) et de type chimique.

Les particules peuvent être décomposées en deux catégories :

- les particules les plus grosses de taille supérieure à 2,5  $\mu\text{m}$ . Ces particules sont principalement issues de phénomènes d'érosion, notamment sous l'effet du vent. Dans cette catégorie sont aussi incluses les particules d'origine biologique comme les pollens et les champignons ;
- les particules de tailles inférieures à 2,5  $\mu\text{m}$ . Ces particules fines sont essentiellement liées aux activités humaines. Elles correspondent à des produits de combustion, aux émissions des véhicules et à d'autres processus.

Les concentrations en particules présentes dans l'air extérieur sont évidemment assez disparates suivant les zones considérées, notamment entre les zones urbaines et les zones rurales, et variables suivant les saisons et certaines périodes de l'année ou de la journée (vacances, jour, nuit).

Pour donner une idée des concentrations présentes, en zone urbaine les concentrations massiques des particules de taille inférieures à 2,5  $\mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  peuvent atteindre quelques dizaines voire plus de 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et pour les tailles inférieures à 10  $\mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , les concentrations peuvent atteindre plusieurs dizaines voire plus de 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Compte tenu des potentiels élevés de concentration particulaires dans l'air extérieur il est important de pouvoir traiter l'air avant de l'introduire dans les bâtiments.

## 5.3- Le bâtiment et les matériaux et les systèmes

Les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) sont un format de communication mettant en avant les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de la construction. Elles fournissent des informations sur les niveaux d'émission des composés organiques volatils totaux déterminés selon un protocole défini de façon normative.

Leur équivalent pour les produits d'équipement du bâtiment (Équipementiers électriques, HVAC, ...) sont les Profils Environnementaux Produits (PEP). Ces fiches ne recensent pas les impacts sanitaires des produits et il n'y a donc aucune donnée disponible sur les rejets nocifs du produit pendant la phase d'utilisation et donc la QAI.

Les caractéristiques environnementales présentes dans ces fiches de communication sont données par les Analyses de Cycle de Vie (ACV – norme ISO 14040), qui considèrent les différents entrants et sortants à chacune des étapes du cycle de vie du produit : de l'extraction des matières premières à la fin de vie du produit.

Les ACV donnent de façon automatique l'impact sur la santé humaine pour les étapes d'extraction, de fabrication et / ou de mise en œuvre (suivant la modélisation). À ce niveau, les émissions dans l'air et dans l'eau pour les différents matériaux et processus sont référencées dans les logiciels de calcul de l'impact (ex. Simapro).

Pour la phase d'utilisation de l'appareil, l'impact environnemental des rejets dans l'air n'est donné que si ces rejets sont intégrés par la personne réalisant l'étude. C'est-à-dire, la modélisation d'1kg de PVC dans une ACV donnera lieu de façon automatique au calcul de l'impact sur la santé humaine de la fabrication de la matière mais pas des éventuels rejets pendant la phase d'utilisation. La phase d'utilisation dans une ACV ne considère pas les matériaux modélisés en phase de fabrication.

L'éco-conception (norme ISO 14062) a pour objectif la diminution des impacts environnementaux du produit sur tout son cycle de vie. Les résultats de l'ACV, présents dans les fiches PEP et FDES, sont

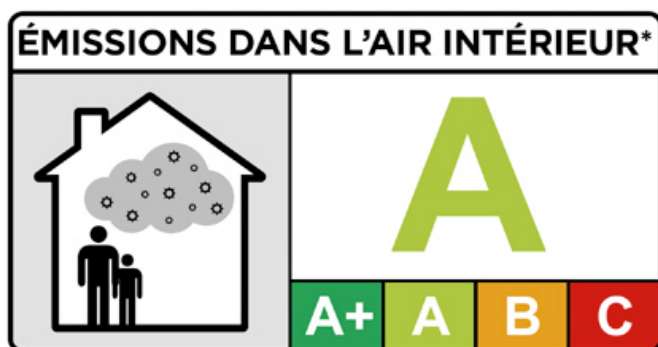
l'un des outils à disposition pour mettre en avant les pistes d'amélioration. L'une des possibilités est de comparer les différentes solutions techniques dans le but de choisir celle ayant l'impact environnemental le plus faible, l'objectif étant de diminuer l'impact global du produit sur son cycle de vie.

Si la QAI se révèle comme un facteur de choix incontournable, il sera nécessaire de pouvoir comparer les émissions des différentes solutions et donc pour cela de posséder les données d'émission des matériaux.

Dans le cas des PEP, si les données liées à la QAI ont été modélisées lors de l'ACV, il sera alors possible de se baser uniquement sur l'ACV pour améliorer le produit. Si ces données sont manquantes, il sera nécessaire de compléter l'étude en considérant également ces éléments, au même titre que les FDES.

L'Eco Conception permet et se doit d'intégrer de façon plus globale les éléments non référencés dans les ACV actuelles, notamment en matière de QAI afin de proposer des solutions améliorées sur l'ensemble des aspects significatifs pour l'environnement et la santé humaine.

En complément, il est utile qu'un arrêté relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils, vient de sortir (Arrêté du 19 Avril 2011).



La classification des produits et matériaux se synthétise en 4 classes allant de A+ à C.

Les classes d'émission de COV (Composés Organiques Volatils) sont définies dans le tableau ci-après (seuils limites de concentration en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Elles sont établies sur la base de mesures réalisées selon des normes établies en cellule d'essai d'émission.

10 COV sont répertoriés ainsi qu'une valeur en COVT (concentration en COV Totaux)

CLASSES	C	B	A	A+
Formaldéhyde	> 120	< 120	< 60	< 10
Acétaldéhyde	> 400	< 400	< 300	< 200
Toluène	> 600	< 600	< 450	< 300
Tétrachloroéthylène	> 500	< 500	< 350	< 250
Xylène	> 400	< 400	< 300	< 200
1,2,4-Triméthylbenzène	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000
1,4-Dichlorobenzène	> 120	< 120	< 90	< 60
Ethylbenzène	> 1500	< 1500	< 1000	< 750
2-Butoxyéthanol	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000
Styrène	> 500	< 500	< 350	< 250
COVT	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000

La réglementation sur les performances environnementales des produits est en marche !

## 6- Solutions et systèmes

Le tableau suivant donne une liste des principaux types de systèmes de ventilation et traitement d'air avec pour chacun une appréciation de sa capacité à traiter les cibles QAI et de son efficacité énergétique.

Les appréciations sont données au moyen de croix. Plus le nombre de croix est élevé et plus le système est performant.

Solutions et systèmes		Critères QAI				Efficacité énergétique
		CO <sub>2</sub>	Particules origine extérieure	Particules origine intérieure	COV	
Systèmes avec ventilation naturelle		*	*	*	*	*
Systèmes sur boucles d'eau associés à une ventilation mécanique	Unité de confort (Ventilo-convecteurs)	***	***	***	***	***
	Poutres climatiques	**	***	*	**	**
	Plafonds/Planchers	**	***	*	**	***
Systèmes tout air centralisés		**	***	*	**	**
Systèmes à détente directe associé à un système de ventilation mécanique		***	***	***	*	***

### Argumentaire :

#### Systèmes avec ventilation naturelle :

Un système basé sur l'ouverture des fenêtres ne permet pas de contrôler les débits de ventilation, ni de traiter l'air avant qu'il ne pénètre dans les locaux. Il n'offre donc pas de protection contre la pollution extérieure. L'absence de maîtrise des débits est aussi mauvaise pour la qualité de l'air intérieur que pour l'efficacité énergétique.

Un système fonctionnant par tirage naturel avec des conduits équipés de grilles d'extraction et des entrées d'air sur les murs extérieurs ne permet qu'un contrôle limité des débits de ventilation. Ce contrôle porte sur la limitation des débits en cas de tirage thermique trop important (période de chauffage). Compte tenu de sa faible réserve de pression ce type de système ne permet pas de traiter la qualité de l'air avant son introduction dans le bâtiment.

#### Systèmes sur boucle d'eau associés à un système de ventilation mécanique :

Quel que soit le type d'émetteurs utilisés, ces systèmes permettent à la fois de contrôler les débits de ventilation et d'intégrer des solutions de traitement de la qualité de l'air extérieur avant son introduction dans le bâtiment. La meilleure solution de ventilation mécanique est un système double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. En cas d'occupation fluctuante cette solution peut être améliorée en modulant les débits de ventilation en fonction du taux d'occupation des locaux pour

adapter les débits aux besoins. Cette option n'est cependant pas adaptée à un émetteur de type poutre climatique qui a besoin d'un apport d'air neuf suffisant pour permettre d'assurer sa performance thermique.

Certains émetteurs peuvent aussi avoir la possibilité de renforcer la qualité de l'air intérieur grâce à un traitement local au niveau de l'émetteur. Cela est le cas des unités de confort de type ventilo-convecteurs qui grâce à la réserve de pression fournie par leur ventilateur peuvent accueillir des fonctions de traitement d'air supplémentaires. Cette particularité permet notamment de traiter la pollution particulaire générée à l'intérieur des locaux. Cette possibilité n'existe pas pour les poutres climatiques et les émetteurs passifs de type planchers ou plafonds.

En ce qui concerne l'efficacité énergétique du système, en période de rafraîchissement, il est important de pouvoir fonctionner sur des régimes d'eau les plus élevés possibles, pour lesquels il est soit possible de fonctionner sur une source froide naturelle (eau de nappe), soit sur un système thermodynamique à haut rendement du fait du niveau de température plus élevé. Cette solution est tout à fait compatible avec les unités de confort de type ventilo-convecteur qui ont une large plage de fonctionnement possible. Par contre cela est moins compatible avec des poutres climatiques et les planchers et plafonds rafraichissants qui ont besoin d'un traitement de l'air neuf basse température pour assurer un niveau de déshumidification suffisant pour absorber les apports hydriques des occupants.

### **Systemes tout air**

Ce type de système basé sur un traitement centralisé de l'air qui sert à conditionner les locaux permet de contrôler la qualité de l'air qui entre dans les locaux mais pas de faire un traitement local de la qualité de l'air intérieur.

### **Systemes à détente directe (VRV)**

Ces systèmes permettent de traiter l'air avant qu'il soit introduit dans les locaux et ils offrent aussi des possibilités de traitement de la qualité de l'air intérieur en zone d'occupation. Cependant ce type de systèmes représente en lui-même un risque important pour la qualité de l'air intérieur vu qu'il utilise un fluide frigorigène distribué sur l'ensemble du bâtiment pour alimenter les émetteurs. Cette source de pollution chimique est un handicap important pour garantir la qualité de l'air intérieur. Elle impacte aussi le bilan environnemental du système (quantité de fluide frigorigène plus élevée).

## 6.3 Annexe Confort Visuel

### 1. Contexte réglementaire et normatif

#### 1.1 La norme 12464-1

C'est une norme européenne ayant statut de norme française depuis le 5 juin 2003. Elle spécifie les prescriptions pour les systèmes d'éclairage des lieux de travail intérieurs et leurs zones associées en termes de quantité et de qualité de l'éclairage ; prescrit les exigences d'éclairage pour les lieux de travail intérieurs en répondant aux besoins de confort visuels et de performance.

L'application de la norme est volontaire, sauf pour les bâtiments publics où elle est obligatoire

Les paramètres les plus importants qui déterminent une ambiance lumineuse sont :

- La distribution des luminances
- L'éclairage
- La direction de la lumière
- Le rendu des couleurs et la couleur apparente de la lumière
- Le papillotement
- La lumière du jour

##### 1. 1. 1 Points principaux relatifs à l'activité tertiaire

La norme 12464-1 introduit la notion de zone pour définir différentes exigences en termes de niveau d'éclairage et d'uniformité.

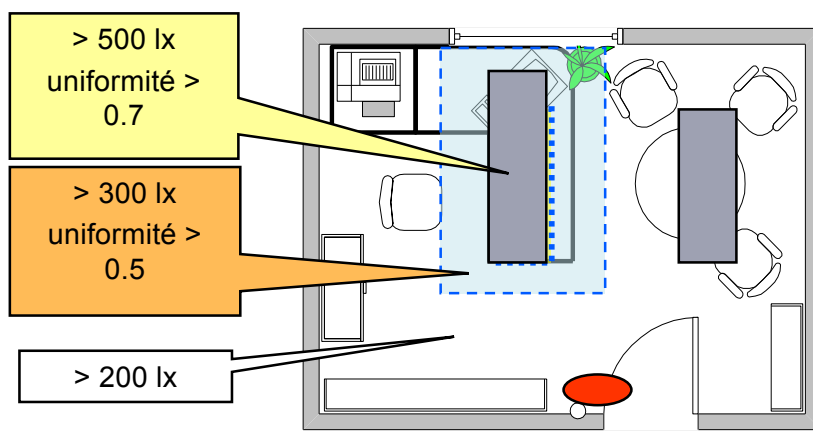
La zone de travail : partie du lieu de travail dans laquelle la tâche visuelle est exécutée. Pour les espaces où la dimension et/ou l'emplacement de la zone de travail est inconnu, l'endroit où la tâche peut être effectuée est pris pour la zone de travail.

La zone environnante immédiate : partie du lieu de travail représentée par une bande de 0,5 m de large au moins entourant la zone de travail dans le champ visuel.

L'éclairage de tâche pour les activités d'écriture, de lecture, de traitement de données et de dactylographie est fixé à 500 lux avec une uniformité  $\geq 0,7$ .

L'éclairage de la zone environnante immédiate est fixé à 300 lux avec une uniformité  $\geq 0,5$ .





### **1.1.2. D'autres paramètres sont définis par la norme :**

L'éblouissement d'inconfort est relatif aux caractéristiques photométriques des luminaires et à leur distribution dans l'espace par rapport à l'œil de l'observateur. Il s'exprime par l'indice UGR de l'installation, lequel doit être  $\leq$  à 19 pour les applications tertiaires les plus courantes.

Le rendu des couleurs est un élément important pour la performance visuelle et le sentiment de confort. L'indice général de rendu des couleurs (Ra) demandé pour le tertiaire doit être au moins égal à 80. Cet indice est une caractéristique technique de la source lumineuse. En réalité tous les tubes fluorescents haut rendement présents sur le marché français ont un indice Ra de 85 ou plus.

La qualité d'une installation d'éclairage doit cependant prendre en compte d'autres paramètres incluant la température de couleur de la source exprimée en Kelvin, ou la distribution des luminances dans le champ visuel.

Ce dernier paramètre influe directement sur le niveau d'adaptation des yeux et donc sur l'acuité visuelle, sur la sensibilité aux contrastes et par conséquent sur le confort visuel global.

Les luminances de toutes les surfaces sont importantes et sont déterminées par le facteur de réflexion et par l'éclairement reçu par ou sur les surfaces.

Les plages de facteurs de réflexion utiles pour les principales parois d'un local sont les suivantes :

- Plafond : 0,6 à 0,9
- Murs : 0,3 à 0,8
- Plan utile : 0,2 à 0,6
- Sol : 0,1 à 0,5

## **1.2. Le code du travail**

Dans le domaine de l'éclairage intérieur, le code du travail est à considérer comme un garde-fou, les valeurs qui y sont indiquées représentant un niveau bas difficilement compatible avec l'exécution des tâches visuelles que nous connaissons dans le tertiaire.

Article R4223-4

Pendant la présence des travailleurs dans les lieux mentionnés à l'article R. 4223-1, les niveaux d'éclairage mesurés au plan de travail ou, à défaut, au sol, sont au moins égaux aux valeurs indiquées dans le tableau suivant :

LOCAUX AFFECTES AU TRAVAIL et leurs dépendances	VALEURS MINIMALES d'éclairage
Voies de circulation intérieure	40 lux
Escaliers et entrepôts	60 lux
Locaux de travail, vestiaires, sanitaires	120 lux
Locaux aveugles affectés à un travail permanent	200 lux

### 1.3. Les règlementations relatives à l'accessibilité des bâtiments

Arrêté relatif aux ERP (01-08-06 consolidé 30-11-07)

Article 14. – Dispositions relatives à l'éclairage

La qualité de l'éclairage, artificiel ou naturel, des circulations intérieures et extérieures doit être telle que l'ensemble du cheminement est traité sans créer de gêne visuelle.

Les parties du cheminement qui peuvent être source de perte d'équilibre pour les **personnes handicapées**, les dispositifs d'accès et les informations fournies par la signalétique font l'objet d'une qualité d'éclairage renforcée.

- 200 lux au droit des postes d'accueil
- 100 lux en tout point des circulations intérieures horizontales
- 150 lux en tout point de chaque escalier et équipement mobile
- 50 lux en tout point des circulations piétonnes des parcs de stationnement
- 20 lux en tout autre point des parcs de stationnement

Lorsque la durée de fonctionnement d'un système d'éclairage est temporisée, l'extinction doit être progressive.

Dans le cas d'un fonctionnement par détection de présence, la détection doit couvrir l'ensemble de l'espace concerné et deux zones de détection successives doivent obligatoirement se chevaucher.

La mise en œuvre des points lumineux doit éviter tout effet d'éblouissement direct des usagers en position « debout » comme « assis » ou de reflet sur la signalétique.

### 1. 4. Règles HQE applicables à l'éclairage des bâtiments tertiaires

La Haute Qualité Environnementale est une démarche de management de projet visant à maîtriser les impacts d'une opération de construction ou de réhabilitation sur l'environnement extérieur ainsi que sur le confort et la santé des usagers, tout en maîtrisant les processus opérationnels, liés ici aux phases de programmation, conception et réalisation. Cette démarche vise à obtenir la Qualité Environnementale du Bâtiment.

**Parmi les 14 cibles que comporte le référentiel HQE, une est très clairement relative à l'éclairage. Il s'agit de la cible 10 ; le confort visuel.**

Cette cible présente des interactions évidentes avec les cibles 04 (gestion de l'énergie), 07 (maintenance pérennité des performances environnementales) et des interactions secondaires avec les cibles 01 (relation du bâtiment avec son environnement immédiat) et 02 (choix des produits, systèmes et procédés).

## 2 Niveau consensuel du confort visuel

L'exigence de confort visuel consiste très généralement d'une part à voir certains objets et certaines lumières (naturelles et artificielles) sans être ébloui, et d'autre part à avoir une ambiance lumineuse satisfaisante quantitativement en termes d'éclairage et d'équilibre des luminances, et qualitativement en termes de couleurs. Ceci afin de faciliter le travail, les activités diverses, dans un souci de qualité, de productivité, ou d'agrément, en évitant la fatigue et les problèmes de santé liés aux troubles visuels.

Utilisée à bon escient, la lumière naturelle a des effets positifs, physiologiquement et psychologiquement, et est recommandée par le Code du Travail.

Afin de réaliser les conditions de confort visuel, il convient d'assurer :

- **un éclairage naturel optimal** en terme de confort afin de profiter au mieux de la lumière naturelle dans les espaces ne nécessitant ; le maître d'ouvrage doit assurer un niveau d'éclairage suffisant pour les tâches visuelles à accomplir et limiter les risques d'éblouissement produits par le soleil (direct ou indirect)
- **un éclairage artificiel satisfaisant** en l'absence ou en complément de lumière naturelle. Le maître d'ouvrage cherche généralement à obtenir un niveau d'éclairage artificiel suffisant. Il cherche également à limiter les risques d'éblouissement par les luminaires et à avoir une qualité de la lumière émise satisfaisante en termes de rendu des couleurs et de couleur apparente.

### **Disposer d'accès à la lumière du jour dans les espaces sensibles.**

Cette préoccupation a pour but d'assurer que les « espaces sensibles » vis-à-vis de l'éclairage naturel (voir introduction de la sous cible) ont accès à la lumière du jour (en premier ou second jour).

### **Disposer d'accès à des vues sur l'extérieur dans les espaces sensibles.**

Cette préoccupation a pour but d'assurer que les espaces ont accès à des vues sur l'extérieur.

### **Disposer d'un éclairage naturel minimal.**

Cette préoccupation a pour but d'assurer un éclairage minimal dans les espaces.

### **Qualité du traitement de la lumière naturelle.**

Cette préoccupation, a pour but de s'assurer que la lumière naturelle introduite dans les espaces soit de « bonne qualité » et non éblouissante. En effet, un apport en lumière naturelle non contrôlé peut être source de gêne visuelle (éblouissement direct ou indirect notamment). Il s'agit donc d'assurer une lumière naturelle de qualité, en priorité dans tous les espaces sensibles à l'éblouissement.

### **Disposer d'un niveau d'éclairage optimal**

Cette préoccupation, de niveau BASE unique, a pour but d'assurer que les locaux de bureaux et d'enseignement bénéficient d'un éclairage artificiel suffisant. Il est demandé d'obtenir une capacité minimale d'éclairage à maintenir (en lux) :

- Bureaux et salles d'enseignement primaire et secondaire : 300 lux
- Salles d'enseignement en cours du soir et aux adultes : 500 lux

Remarques : - Ces seuils correspondent à une **capacité minimale d'éclairage** à maintenir, non à un éclairage effectif. Ces seuils s'entendent sur le plan de travail. Cette capacité minimale d'éclairage sur le plan de travail peut provenir de plusieurs sources, au plafond (éclairage de fond), localisée sur le plan de travail (éclairage de tâche), etc. Le niveau à maintenir se traduit par une valeur plus faible que le niveau en service. Définition donnée dans la norme NF EN 12464-1 : valeur en dessous de laquelle l'éclairage moyen de la surface considérée ne peut pas descendre. Il s'agit de l'éclairage au moment ou la maintenance doit être assurée. - Pour les **autres locaux** pouvant être présents dans un bâtiment de bureaux ou d'enseignement, voir **la norme NF EN 12464**, très complète, qui distingue de nombreux types de locaux pour lesquels les éclairages à maintenir sont

définis. - La valeur de 300 lux pour les bureaux est nettement inférieure aux valeurs données dans la norme NF EN 12464, mais la pratique des professionnels tend à montrer qu'une valeur de 300 lux est suffisante. Pour des usages particuliers (dessin industriel par exemple) adopter des valeurs adaptées (norme), éventuellement en distinguant l'éclairage de fond et l'éclairage de tâche.

**Assurer une bonne uniformité de l'éclairage** Le but de cette préoccupation est de s'assurer de la bonne uniformité de l'éclairage artificiel des locaux de bureaux et d'enseignement.

**Eviter l'éblouissement dû à l'éclairage artificiel et rechercher un équilibre des luminances de l'environnement lumineux intérieur** Cette préoccupation, a pour but d'éviter l'éblouissement dans les locaux et de rechercher un équilibre des luminances.

**Assurer une qualité agréable de la lumière émise** Cette préoccupation a pour but d'assurer une qualité agréable de la lumière émise.

**Maîtrise de l'ambiance visuelle par les usagers** Cette préoccupation a pour but d'assurer aux usagers une maîtrise de leur ambiance visuelle.

#### La norme NF X35-103 : Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail

La présente norme décrit des principes et une méthode ergonomique visant à définir les éléments essentiels à un projet d'éclairagisme. Elle s'applique en situation réelle de travail y compris les déplacements. Elle concerne les ambiances lumineuses en vision photopique. La plupart des principes se réfèrent à l'éclairage des situations de travail, que celui-ci soit assuré par un apport de lumière naturelle, de lumière artificielle ou par un apport combiné des deux.

La présente norme tient compte des recommandations du guide ISO/CEI 71 afin de répondre aux besoins des personnes âgées et de celles ayant des incapacités. Des repères concernant la prise en compte des pathologies visuelles sont donnés. Néanmoins, du fait de leur diversité et de solutions d'aménagement pouvant être contradictoires, les besoins en éclairage des personnes présentant une déficience visuelle (mal voyants) doivent être déterminés à partir d'une analyse spécifique.

NOTE la présente norme prend en compte les critères généraux applicables au travail sur écran au même titre que les autres sources de luminance. Cependant, pour les spécificités du travail sur écran, se référer aux normes ISO 9241 séries 300 et 600.

### **Le confort visuel et la gestion de l'énergie**

La relation entre éclairage et gestion de l'énergie est directement proportionnelle. Dans l'objectif de diminuer la consommation spécifique de l'éclairage, il convient de reprendre comme référence la RT 2005 (voir chapitre précédent) et de mettre en place tout dispositif permettant d'améliorer la performance énergétique de ce poste, sans dégrader les caractéristiques techniques faisant l'objet de la norme 12464-1.

### **3. Impact de l'éclairage sur la santé**

Les effets de la lumière sur l'organisme sont connus depuis le début des années 80. Il est maintenant scientifiquement établi que le manque de lumière est directement responsable de ce qu'on appelle aujourd'hui plus communément la dépression saisonnière. Ces mécanismes biologiques complexes font intervenir notre système visuel, notre cerveau et notre horloge biologique (Sur ce point, voir les travaux du docteur Claude Gronfier, chargé de recherches du département chronobiologie de l'Inserm).

Qu'en est-il de l'éclairage, par définition artificiel ? A delà des notions de confort, de niveau d'éclairement ou de qualité de la lumière, a-t-il un impact sur notre santé ?

En premier lieu, il faut repositionner l'éclairage tertiaire par rapport à la lumière naturelle. Celui-ci apporte des niveaux d'éclairement allant de 150 lux à 600 ou 700 lux maximum pour certaines applications. Nous sommes donc loin des 10000 lux dont on sait qu'ils influencent physiologiquement l'être humain.

Cependant l'éclairage semble bien avoir une action sur la santé, mais c'est dans l'aspect psychologique qu'il faut chercher la réponse.

La lumière, son intensité, sa direction, les contrastes qu'elle génère sont directement perçus par le cerveau et interprétés en termes d'ambiance. Celle-ci peut être tantôt perçue comme bonne positive, tantôt comme neutre voire négative.

Cette perception d'un environnement lumineux positif ou négatif influence indirectement notre humeur et donc notre aptitude au travail. Il va de soi que d'autres facteurs (décoration, revêtement, mobilier etc...) interviennent de la même façon et ajoutent ou retranchent à la perception globale que nous avons de notre environnement de travail.

Un point reste cependant unique quant à l'importance de la lumière puisque plus de 70% de ce que nous percevons autour de nous passe par la vue et donc par son vecteur qui est justement la lumière. Il faut donc prendre en compte cette sur-représentativité dans notre analyse des phénomènes liés à l'éclairage.

*Pour cet aspect, voir en Annexe 6.8 les travaux de l'ENTPE de Lyon.*

#### **4. L'éclairage dynamique : reproduire les effets de la lumière naturelle par Philipp Dreher de l'université technique de Munich**

Depuis l'invention de la lampe incandescente et le triomphal succès de l'électricité, la qualité de la lumière du jour avec sa gamme de changements dynamiques est tombée dans l'oubli.

La possibilité de l'éclairage artificiel de fournir des niveaux d'éclairage constants indépendamment du moment de la journée, d'une simple pression sur un bouton, constitue, sans nul doute, une haute qualité de vie. Cependant, cela laisse de côté un aspect important : une connexion avec l'extérieur en liaison avec la saison, le moment de la journée et la situation climatique, autant de facteurs qui jouent un rôle important pour l'être humain.

Tandis que la lumière du jour est naturellement sujette à de fortes fluctuations, elle apporte néanmoins des informations essentielles sur le monde extérieur à travers ses changements dynamiques.

L'éclairage artificiel fonctionne d'ordinaire selon des schémas statiques. Les effets lumineux obtenus de façon dramatique ne sont généralement réalisés que dans de rares cas marginaux. Il existe un effet bien connu largement utilisé dans les bars, plus la soirée s'avance et plus le barman baissera le niveau de lumière pour créer une atmosphère chaleureuse et confortable. Quand la soirée touche à sa fin, la lumière reprend tout son éclat et sa puissance, ce qui est compris comme le signal du départ.

Il n'existe que très peu d'exemples d'éclairage dynamique voulus pour lesquels les effets ont été créés pour influencer directement le comportement, la capacité à se concentrer ou pour susciter une ambiance de détente. Un exemple est l'adaptation des salons pour les pilotes de ligne où les scénarios de lumière du jour ou du soir peuvent être simulés, indépendamment du moment de la journée, pour gommer les effets gênants des décalages horaires.

Un autre exemple est celui des boîtes à lumière qui remportent un grand succès en Scandinavie et qui traitent de la dépression saisonnière. Les patients sont exposés à des niveaux élevés de lumière pendant plusieurs heures pour compenser le faible niveau de luminosité qu'offre une journée d'hiver.

Tout le monde peut exercer une influence ou un contrôle sur les niveaux d'éclairage dans les parties privées d'habitation, mais dans les lieux de travail, en général c'est un éclairage statique qui prévaut.

Les principes d'éclairage appliqués aux bureaux et dans l'administration en général se contentent de satisfaire strictement aux niveaux d'éclairement exigés par la norme DIN. L'éclairage dynamique n'est pas pris en compte. Mais pourquoi ne pas fournir brièvement des niveaux d'éclairement élevés de temps en temps pour stimuler l'attention et redonner de l'énergie ?

Les aspects psychologiques jouent un rôle important pour savoir jusqu'à quel point les fluctuations de la lumière peuvent être tolérées. Par conséquent, une nouvelle approche du projet d'éclairage doit être mise en œuvre visant à ne pas perturber mais à améliorer le bien-être des utilisateurs en jouant judicieusement sur les niveaux d'éclairage et l'éclairage dynamique.

### **L'éclairage comme moyen d'améliorer la vie des gens**

En tant que fabricant de matériel d'éclairage, Philips s'efforce constamment d'améliorer les qualités de la solution artificielle afin d'offrir l'éclairage qui améliore la vie des gens. Le concept d'Eclairage Dynamique marque une étape dans ce voyage, le début d'une approche qui tend à introduire quelques-uns des aspects positifs de l'éclairage naturel dans un environnement de travail. Si nous pouvons assimiler quelques-unes

des qualités de la lumière naturelle d'éclairage et de température de couleur au cours d'une journée, alors nous pouvons créer un environnement plus naturel et plus stimulant.

L'approche de l'Eclairage dynamique utilise l'une des propriétés de l'éclairage artificiel les plus intéressantes, à savoir sa « mobilité » et sa facilité de contrôle. La lumière naturelle, bien qu'elle offre des avantages indiscutables, est difficile à maîtriser : sa direction, sa variation et la chaleur qu'elle dégage peuvent provoquer un éblouissement et des conditions de vision inconfortables.

Pour cette raison, il est souvent nécessaire d'obstruer la lumière naturelle, ce qui risque de limiter son efficacité et sa pénétration dans l'espace.

Avec l'éclairage artificiel, bien que souvent utilisé de façon limitée, s'offrent de multiples possibilités de jouer, diriger, modifier, adapter et contrôler, en plaçant la lumière là où on en a besoin et quand on en a besoin.

Des qualités naturelles, des ambiances attrayantes La lumière naturelle comporte certaines qualités liées à ses rythmes auxquels nous, êtres humains, nous sommes adaptés au fil des ans. La variation cyclique de la clarté et de la couleur selon le moment de la journée, la saison, le lieu, provoquent une série de réactions dans nos corps, en liaison avec nos activités tout au long d'une journée. La fraîcheur de l'aube, avec sa lumière qui comprend des niveaux élevés de bleu dans le spectre, nous réveille et nous stimule. Des niveaux plus élevés et une lumière plus froide contrebalanceront l'état léthargique qui suit le déjeuner.

Nous aimons contrôler notre environnement et ce désir d'autonomie, de maîtrise s'étend à l'éclairage de notre environnement de travail. Cela peut être dicté par des préférences personnelles – certaines personnes préfèrent une lumière blanche froide, d'autres une lumière blanche chaude – ou par la tâche que nous devons effectuer. Il existe toutes sortes de moments et de situations dans une journée de travail qui requièrent une lumière différente, et l'Eclairage Dynamique peut offrir une ambiance pertinente, variable, voire une lumière personnalisée, lorsque quelqu'un travaille seul dans un bureau par exemple, il peut configurer l'éclairage de la pièce exactement comme il le souhaite, ou bien une ambiance dynamique, avec un éclairage qui change au cours de la journée, adapté aux espaces tels que les bureaux paysagers où plusieurs personnes travaillent ensemble.

L'Eclairage Dynamique peut aussi contribuer à modifier l'apparence même de l'architecture – par exemple avec une température de couleur chaude qui révèle la texture organique naturelle du bois, ou une température de couleur froide qui souligne les surfaces métalliques et en accentue les détails, comme les découpes par exemple.

## 6.4 Annexe Acoustique

### 1. Définition du critère de confort acoustique

Le son est produit par une vibration qui provoque une oscillation de pression.

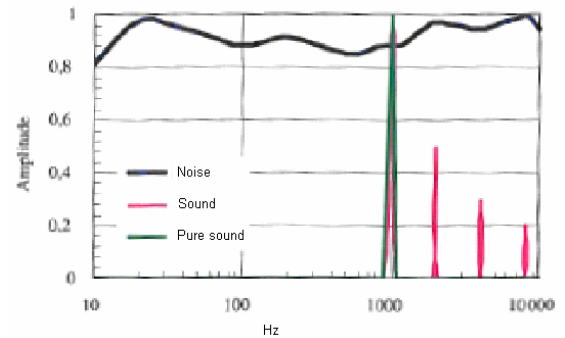
L'onde acoustique peut se propager dans toutes les formes de matière : gaz, liquides, solides.

La matière servant de support à la propagation du son s'appelle le milieu

L'oreille humaine peut percevoir des sons à des fréquences comprises aux alentours de 16 Hz à 16 000 Hz.

Le graphique de droite illustre la différence entre un spectre de bruit et un son (pur).

Comme l'oreille humaine détecte des sons dans une plage d'amplitudes étendue, on mesure souvent la pression acoustique sous forme de niveaux sur une échelle logarithmique de décibels. Le niveau de pression acoustique (NPA) ou LP est défini comme suit :



$$L_p = 10 \log (i/i_0) = 20 \log (p/p_0)$$

Où :

p: pression acoustique, en Pa.

i: intensité acoustique, en  $W/m^2$ .

$i_0$ : intensité acoustique de référence ( $i_0 = 10^{-12} W/m^2$ ).

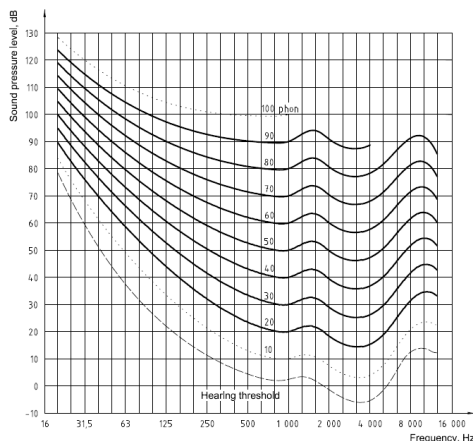
$p_0$ : pression acoustique de référence ( $p_0 = 2,10^{-5} Pa$ ).

Courbe d'isotonie :

La perception par l'oreille humaine est un phénomène complexe qui dépend des niveaux de pression acoustique et des fréquences.

On a établi des courbes qui définissent des combinaisons de tons purs en termes de fréquence et de niveau de pression acoustique qui sont perçues d'intensité sonore égale. Elles expriment une propriété fondamentale du système auditif humain et sont d'une importance primordiale en psychoacoustique.

Combinaisons de niveaux de pression acoustique et de fréquences de tons purs continus produisant la même sensation sonore chez un auditeur humain :



Courbes d'isotonie normales pour des tons purs dans des conditions d'écoute en champ libre.

Niveau d'isotonie: valeur en phone d'un son de comparaison identique au niveau de pression acoustique en décibels d'un son pris comme référence composé d'une onde libre sinusoïdale plane à incidence frontale à une fréquence de 1000Hz, dont l'intensité sonore est jugée équivalente à celle du son de comparaison.

Source : ISO 226: 2003

La commission électrotechnique internationale (CEI) a défini plusieurs méthodes de pondération. La pondération "A" cherche à établir une correspondance entre la réaction de l'oreille humaine et un bruit donné. Les niveaux de pression acoustique pondérés "A" sont exprimés en dBA.

	31,5 (Hz)	63 (Hz)	125 (Hz)	250 (Hz)	500 (Hz)	1 000 (Hz)	2 000 (Hz)	4 000 (Hz)	8 000 (Hz)
$\Delta$ (dB)	-	- 26,2	- 16,1	- 8,6	- 3,2	0	+ 1,2	+ 1,0	- 1,1

Valeur de correction de la pondération A.

Source : EN ISO 16032: 200

**Bruit et spécificité de l'environnement:**

Le bruit généré par les équipements de CVC des bâtiments peuvent gêner les occupants et priver les locaux de l'usage auquel ils sont destinés. On peut évaluer le bruit ambiant en utilisant un niveau de pression acoustique pondéré A équivalent.

Building	Type of space	Sound pressure level [dB(A)]	
		Typical range	Default design value
Residential	Living room	25 to 40	32
	Bed room	20 to 35	28
Child care institutions	Nursery schools	30 to 45	40
	Day nurseries	30 to 45	40
Places of assembly	Auditoriums	30 to 35	33
	Libraries	28 to 35	30
	Cinemas	30 to 35	33
	Court rooms	30 to 40	35
	Museums	28 to 35	30
Commercial	Retail shops	35 to 50	40
	Department stores	40 to 50	45
	Supermarkets	40 to 50	45
	Computer rooms, large	40 to 60	50
	Computer rooms, small	40 to 50	45
Hospitals	Corridors	35 to 45	40
	Operating theatres	30 to 48	40
	Wards	25 to 35	30
	Bedrooms night-time	20 to 35	30
	Bedrooms daytime	25 to 40	30
Hotels	Lobbies	35 to 45	40
	Reception rooms	35 to 45	40
	Hotel rooms (during night-time)	25 to 35	30
	Hotel rooms (during daytime)	30 to 40	35
Offices	Small offices	30 to 40	35
	Conference rooms	30 to 40	35
	Landscaped offices	35 to 45	40
	Office cubicles	35 to 45	40

Le tableau suivant se base uniquement sur le bruit émanant d'équipements du bâtiment et pas sur le bruit extérieur. Il fournit des valeurs recommandées.

Critères de bruit des équipements intérieurs de certains locaux et bâtiments.

Normalement, les critères de bruit n'ont pas d'impact sur la performance énergétique des bâtiments. Cependant, la ventilation mécanique ou naturelle de certains bâtiments peut induire un niveau sonore inacceptable venant de l'extérieur (ouverture des fenêtres) ou des ventilateurs.

Source : NF EN 15251

**Bruit et répercussions sur la santé :**

Le bruit est fortement préjudiciable à la santé humaine. Il affecte nos activités quotidiennes à l'école, au bureau, à la maison et pendant les loisirs. Le bruit de la circulation à lui seul nuit à la santé de presque un européen sur trois. L'organisation mondiale de la santé identifie les risques sanitaires suivants liés au bruit : douleur et fatigue auditive ; déficit auditif, y compris les acouphènes ; contrariété ; entraves à la vie sociale (agressivité, irritabilité et situation de détresse) ; perturbation de la communication verbale ; trouble du sommeil avec tous ses effets à court et long terme ; troubles cardiovasculaires ; réponse hormonale au stress et ses conséquences possibles sur le métabolisme (nutrition) et le système immunitaire ; efficacité au travail et à l'école.



Le tableau suivant présente les valeurs de référence de l'OMS en fonction de l'environnement et de l'impact sur la santé.

Specific environment	Critical health effect(s)	L <sub>Aeq</sub> [dB(A)]	Time base [hours]	L <sub>Amax</sub> fast [dB]
Outdoor living area	Serious annoyance, daytime and evening Moderate annoyance, daytime and evening	55 50	16 16	- -
Dwelling, indoors	Speech intelligibility & moderate annoyance, daytime & evening	35	16	-
Inside bedrooms	Sleep disturbance, night-time	30	8	45
Outside bedrooms	Sleep disturbance, window open (outdoor values)	45	8	60
School class rooms & pre-schools, indoors	Speech intelligibility, disturbance of information extraction, message communication	35	during class	-
Pre-school bedrooms, indoor	Sleep disturbance	30	sleeping-time	45
School, playground outdoor	Annoyance (external source)	55	during play	-
Hospital, ward rooms, indoors	Sleep disturbance, night-time Sleep disturbance, daytime and evenings	30 30	8 16	40 -
Hospitals, treatment rooms, indoors	Interference with rest and recovery	#1		
Industrial, commercial shopping and traffic areas, indoors and outdoors	Hearing impairment	70	24	110
Ceremonies, festivals and entertainment events	Hearing impairment (patrons:<5 times/year)	100	4	110
Public addresses, indoors and outdoors	Hearing impairment	85	1	110
Music and other sounds through headphones/earphones	Hearing impairment (free-field value)	85 #4	1	110
Impulse sounds from toys, fireworks and firearms	Hearing impairment (adults) Hearing impairment (children)	- -	- -	140 #2 120 #2
Outdoors in parkland and conservations areas	Disruption of tranquillity	#3		

Exemples :

Dans les habitations, le bruit engendre généralement des troubles du sommeil, de la contrariété et une perturbation de la communication verbale. Dans les chambres à coucher, la conséquence notoire est le trouble du sommeil. Les valeurs de référence en intérieur pour les chambres à coucher sont de 30 dB LAeq pour un bruit continu et de 45 dB LAmax pour des bruits intermittents.

Pour que l'on puisse mener une conversation normale pendant la journée en intérieur, la perturbation sonore ne doit pas dépasser 35 dB LAeq.

#1 aussi bas que possible

#2 pression acoustique de crête mesurée à 100 mm de l'oreille

#3 les espaces de détente extérieurs doivent être préservés et le rapport entre la pollution sonore et le bruit de fond naturel doit rester faible.

#4 sous un casque, ajusté aux valeurs en champ libre.

Source : OMS, Directives relatives au bruit dans l'environnement, 1999.

Temps de réverbération :

Le temps de réverbération d'une pièce constitue le principal indicateur de ses propriétés acoustiques. Sa mesure est importante pour maîtriser le bruit comme pour évaluer l'adéquation d'une pièce avec la conversation et la musique.

**Temps de réverbération, T<sub>R</sub>:**

Temps, exprimé en secondes, qui serait nécessaire pour que niveau de pression acoustique diminue de 60 dB après disparition instantanée de la source sonore.

T<sub>R</sub> est proportionnel aux dimensions de la pièce et inversement proportionnel à son aire d'absorption.

$$T_R = 0,163.V/A \text{ (formule de Sabine)}$$

Où :

T<sub>R</sub>: temps de réverbération en s.

V: volume de la pièce en m<sup>3</sup>.

A: aire d'absorption de la pièce en m<sup>2</sup>.

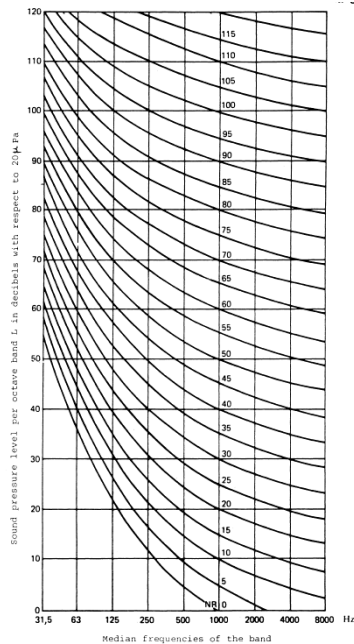
Le temps de réverbération optimal pour un local dans lequel on écoute de la musique dépend de ses dimensions et de sa destination. Une pièce destinée à des conversations nécessite un temps de réverbération plus court qu'une pièce destinée à la musique, sous peine de gêner la compréhension de la parole.

Valeurs de temps de réverbération en fonction des environnements.

Source : NF S 31-080.

Courbes NR (courbes d'évaluation du bruit):

Les cahiers des charges ou des réglementations particulières déterminent souvent le bruit maximum admissible produit par une machine à un emplacement donné en se référant à des courbes d'évaluation connues sous le nom de "courbes NR". Ces courbes (ISO) sont définies par la recommandation ISO R 1996.



Elles sont illustrées dans le schéma suivant :

Le nombre figurant sur chaque courbe marque l'intersection entre une ordonnée (en décibels) et 1000 Hz en abscisse.

Pour évaluer un bruit spécifique, on place les points de son spectre dans les bandes d'octave correspondantes du diagramme. La valeur NR est donnée par la fréquence la plus élevée du spectre tangente à la courbe suivante dans le diagramme.

Source : NF S 30-010.

## **6.5 Annexe Confort Thermique : Document Homes**



**Note de synthèse DTS/LIS/2009/21**



**Extrait du livrable « Les fondamentaux du confort d'ambiance »**

*Auteur: ALESSI Franck*

Référence PRODEM      A-EFTBA662DD  
Nature du rapport      Note de synthèse

	Rédacteur	Vérificateur (s)	Approbateur
Nom	ALESSI Franck	BURGUN Françoise	MANIFICAT André
Fonction	Ingénieur de recherche	Chef de laboratoire	Responsable Programme
Signature		 <b>Françoise BURGUN</b> Chef de Laboratoire d'Intégration Solaire	
Date	23/01/09	28/01/09	03/02/2009

## A. Le confort thermique :

Le confort thermique, comme son nom l'indique, est le confort lié à une répartition de température et de flux de chaleur agréables, et consiste à n'avoir ni trop chaud, ni trop froid.

Bien que l'homme puisse s'adapter aux conditions climatiques extérieures en perpétuel changement, il y a pourtant une zone définie, la zone de confort, dans laquelle il se sent le mieux.

L'acceptabilité de l'ambiance thermique et la perception du confort et de la température dépendent de la production de chaleur conditionnée par le métabolisme, de l'émission de celle-ci dans l'environnement et des adaptations physiologiques qui en résultent, de la température du corps et de la transpiration. Le manque de confort chaud ou froid peut susciter une insatisfaction (inconfort thermique général). Le fait qu'une partie du corps dispose de chaleur ou de froid à un taux indésirable peut aussi susciter un désagrément (inconfort thermique local comme l'apparition de courant d'air).

Afin de mieux comprendre, la chaleur est une énergie résultant de l'agitation moléculaire de la matière. Cette agitation se mesure par la température obtenue dans un milieu donné. Par exemple, au zéro absolu, l'agitation thermique est nulle, la plupart des matériaux sont sous forme solide, généralement cristalline.

Le déplacement naturel de la chaleur se fait des zones chaudes vers les zones froides en utilisant essentiellement quatre modes de transport :

- *La conduction* : transmission de proche en proche de l'agitation moléculaire par choc entre les molécules ;
- *La convection* : transport de chaleur naturel ou forcé de matière chaude vers une zone froide ou vice versa ;
- *Le rayonnement* : transport de chaleur par émission et absorption de rayonnements électromagnétiques à partir de la surface des corps ;
- *L'évaporation-condensation* : la chaleur cédée à un matériau pour l'évaporer est restituée à la surface sur laquelle la vapeur se condense.

Le transfert de chaleur se quantifie par le *flux de chaleur* (en Watt) qui exprime la quantité d'énergie passant chaque seconde au travers d'une surface quelconque, ou localement, par une *densité de flux de chaleur* (en Watt/m<sup>2</sup>) qui exprime la quantité d'énergie transmise chaque seconde au travers d'une surface unité.

Le corps humain a la propriété, quelles que soient les conditions atmosphériques et l'activité physique, de maintenir une température pratiquement constante (le corps est homéotherme). Il doit donc exister un certain équilibre entre la chaleur produite dans le corps et celle émise voire stockée par ce dernier. Cette température uniforme du corps est maintenue à  $37^{\circ}\text{C} \pm 0,8^{\circ}\text{C}$  grâce au sang, qui en circulant alimente toutes les parties de celui-ci.

La régulation de la température est commandée par le « *centre thermorégulateur* » situé dans l'hypothalamus. Les organes sensitifs de cette régulation sont des terminaisons nerveuses dans la peau et dans les centres de chaleurs (thermorécepteurs), qui influent tantôt sur la production de chaleur, tantôt sur la déperdition de chaleur.

Un certain nombre de facteurs agissent sur la régulation physique de température pour adapter l'émission extérieure de chaleur du corps à la température de ce dernier. Ainsi, il existe plusieurs formes de déperdition :

- par convection de la chaleur de la surface du corps à l'air ;
- par conduction de la chaleur au contact de surfaces ;
- par rayonnement de chaleur de la surface du corps sur les surfaces alentours ;
- par évaporation de l'eau sur la peau ;
- par respiration ;
- par élimination, ingestion d'aliments, etc.

Les 5 premières sources de perte de chaleur, à savoir la convection, la conduction thermique, le rayonnement, l'évaporation et la respiration jouent un rôle important.

Si la température de la pièce est inférieure à la limite du confort et qu'il fait donc trop froid, les vaisseaux sanguins rétrécissent, la peau pâlit et se dessèche, et la température à la surface de la peau diminue. Ce faisant, la déperdition de chaleur à l'air baisse, tant par convection, que par rayonnement et évaporation (chair de poule, frisson).

Si la température de l'air dépasse la température de confort ou si le métabolisme augmente, une grande quantité de sang se déverse dans les vaisseaux sanguins, la peau rougit, la température de la surface de la peau augmente. De ce fait, les déperditions de chaleur par rayonnement, convection et conduction, qui dépendent directement de la différence de température entre la peau et l'ambiance, diminuent. Ces échanges de chaleur ne suffisent pas à rafraîchir suffisamment le corps. L'évacuation de la chaleur a lieu essentiellement par évapo-transpiration. Les glandes sudoripares présentes sous la peau éjectent de la sueur, le corps commence à transpirer, et l'évaporation entraîne un refroidissement. (Il faut  $2500 \text{ J/g}$  de sueur pour que celle-ci s'évapore; L'évaporation de  $1 \text{ g/h}$  permet d'évacuer  $0,75 \text{ W}$ ).

Notons que dans la zone confortable, les échanges par rayonnement, convection-conduction et évapo-transpiration se répartissent en 3 parts approximativement égales.

Contrairement à ce qu'il est admis, il est erroné de vouloir satisfaire les exigences de confort thermique par une simple régulation de la température de l'air intérieur. Les facteurs qui suivent influencent le bilan thermique et les déperditions :

Les facteurs liés à l'individu :

- son activité (*met*);
- son habillement (*clo*).

Les facteurs liés à l'environnement :

- température de l'air ( $t_a$ );
- température moyenne de rayonnement ( $t_r$ );
- vitesse de l'air et degré de turbulence, respectivement ( $v_a$ ) et ( $T_u$ );
- pression de vapeur d'eau ou humidité relative (HR).

Précédemment nous avons vu que la notion de confort pouvait être définie de diverses manières (l'absence de sensation d'inconfort, une sensation de bien être générale, des mécanismes d'autorégulation du corps maintenus à leur niveau minimum d'activité).

La norme NF EN ISO 7730 précise qu'il y a confort thermique si deux conditions sont satisfaites :

- le bilan thermique de l'individu est équilibré sans que ses mécanismes autorégulateurs ne soient trop sollicités ;
- il n'existe pas d'inconforts locaux dus :
  - à la sensation de courant d'air ;
  - à l'asymétrie du rayonnement ;
  - au gradient vertical de température ;
  - à la température du sol.

### A.1 Confort thermique global.

Pour qu'une ambiance thermique soit acceptable, il faut qu'une personne se sente thermiquement neutre dans l'ensemble de son corps (c'est à dire qu'elle ne sache pas s'il est préférable que la température environnante soit plus chaude ou plus froide).

Rappelons que la sensation de chaleur dépend de l'activité, de la résistance thermique des vêtements, de la température d'air, de la température moyenne radiante, de la vitesse de l'air et de l'humidité.

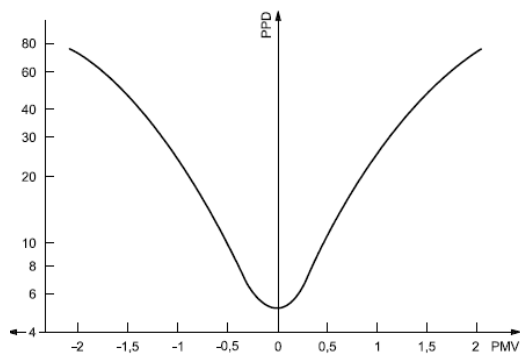
Les indices PMV et PPD.

Ces facteurs peuvent être combinés de multiples manières pour créer une ambiance thermique agréable. La norme NF EN ISO 7730 quantifie la sensation de confort thermique sur la base des indices PMV-PPD. Le vote moyen, appelé *PMV* (Predicted Mean Vote) est l'appréciation moyenne d'une population dans un environnement donné, exprimant leur sensation thermique sur une échelle de -3 à +3 (-3 : très froid ; -2 : froid ; -1 : frais ; 0 : neutre ; +1 : tiède ; +2 : chaud ; +3 : très chaud). Un PMV nul correspond à un confort optimal.

La qualité d'une ambiance thermique peut aussi s'exprimer par le Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits, appelé PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), qui dépend de la valeur PMV (Cf. le tableau A-1 et la figure A-2).

**Tableau A-1 : Corrélation entre PMV et PPD**

<b>PMV</b>	+3	+2	+1	+0,5	0	-0,5	-1	-2	-3
<b>PPD</b>	90%	75%	25%	10%	5%	10%	25%	75%	90%



**Fig. A-2 : PPD en fonction du PMV (norme NF EN ISO 7730).**

On constate que dans les meilleures conditions, il reste encore 5% d'insatisfaits !

La température opérative.

La température opérative est un indice de confort intégrant l'effet de la convection et du rayonnement. La température opérative est une moyenne pondérée de la température de l'air  $T_a$  et de la température radiante  $T_r$ , et s'écrit de la manière suivante :

Température opérative

$$T_{op} = a.T_a + (1-a)T_r$$

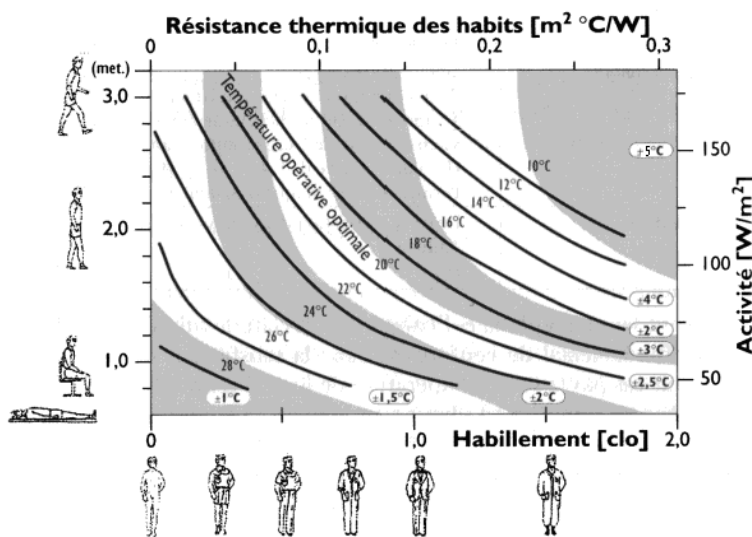
Où  $a = 0,5 + 0,25v_a$



Si la vitesse relative de l'air ( $v_a$ ) est nulle ou négligeable, ce qui est souvent le cas lorsqu'il n'y a pas de courant d'air, la température opérative est une moyenne arithmétique de  $T_a$  et  $T_r$  où  $a = 0,5$ .

Si la vitesse de l'air vaut 2 m/s ou plus, la température opérative est égale à la température de l'air, les surfaces environnantes n'ont plus d'effet sensible.

Pour un lieu donné, il existe une température opérative optimale, correspondant à un  $PMV=0$ , qui dépend de l'activité et de l'habillement des occupants, et ce pour une vitesse de l'air basse (moins de 0,1 m/s) et une humidité relative normale (35 à 65%). La trame hachurée figure la zone  $-0,5 < PMV < +0,5$ , ce qui donne un  $PPD=10\%$  d'insatisfaits. Les tolérances des températures qui en découlent sont également indiquées. Une approximation de la température opérative est donnée par la moyenne de  $T_a$  et  $T_r$ .



**Fig. A-3 :** Température opérative optimale pour un  $PMV=0$  en fonction de l'activité et de l'habillement. Humidité relative de l'air de 50%.

### Vitesse de l'air.

Une température ambiante élevée peut être compensée par une vitesse plus importante de l'air (norme NF EN ISO 7730).

### L'humidité.

Comme les déperditions thermiques du corps humain résultent en partie aussi de la déshydratation de la peau, l'humidité de l'air exerce également une influence certaine sur le

bien être. En effet, l'intensité de la déshydratation de la peau dépend dans des conditions analogues de la différence de pression partielle de vapeur d'eau à la surface de la peau et de celle de l'air.

On considère que l'humidité de l'air n'a que peu d'influence sur la sensation de confort tant qu'elle est comprise entre 30 et 70% et que les autres paramètres de confort donnent un PMV inférieur à 1.

### L'habillement.

L'habillement a une grande influence sur le confort. Dans une pièce trop froide, on peut gagner du confort en s'habillant plus chaudement, de la même manière dans une pièce trop chaude en s'habillant plus légèrement. La vêtue représente une résistance thermique ( $m^2K/W$ ) entre la surface de la peau et l'environnement.

La résistance thermique peut s'exprimer en *Clo* : 1 *Clo* = 0,155 $m^2K/W$  (correspondant à une tenue d'intérieure pour l'hiver: sous-vêtements, chemise à manche longue, pull-over, pantalon ou robe, chaussettes et chaussures).

**Tableau A-4 : Résistance thermique des tenues vestimentaires :**

Valeurs en Clo pour quelques habillements (ISO 1993)		
Tenue vestimentaire	[Clo]	[m <sup>2</sup> K/W]
Nu, debout	0	0
Shorts, costume de bain	0,1	0,015
Tenue tropicale:slip, chemise courte à col ouvert, shorts, chaussettes légères et sandales	0,3	0,045
Tenue d'été: slip, chemise courte à col ouvert, pantalons longs légers ou jupe, chaussettes légères et chaussures	0,5	0,08
Tenue de travail légère: sous-vêtements légers, chemise courte à col ouvert, pantalons de travail, chaussettes et chaussures	0,7	0,11
Tenue d'intérieure pour l'hiver: sous-vêtements, chemise à manche longue, pull-over, pantalon ou robe, chaussettes et chaussures	1	0,15
Tenue de ville: sous-vêtements à manches et jambes longues, chemises à manches longues, pantalons et gilet ou robe, veste, chaussettes épaisses et chaussures	1,5	0,23
Tenue d'hiver fourrée	3	0,45

L'activité corporelle.

L'activité d'une personne a aussi une certaine influence sur la température opérative de confort. Plus un individu est actif, plus son niveau métabolique (dégagement thermique) augmente.

L'unité pour exprimer le métabolisme ou l'activité d'une personne est le *met* :  
 1 met = 58W/m<sup>2</sup> de surface corporelle pour un individu au repos, assis.

Pour un individu exerçant une activité corporelle intense (course à 10 km/h) le niveau métabolique équivaut à 8 met (Cf. tableau A-5).

**Tableau A-5 : Métabolisme moyen correspondant à diverses activités**

Tableau de métabolisme moyen correspondant à diverses activités (ISO 1993)			
Activité	Dégagement de chaleur		
	(ASTM)	[W/m <sup>2</sup> ]*	[W/pers]**
Couché, inactif, sommeil	0,8	46	83
assis, inactif	1	58	104
Activité sédentaire (bureau, lecture, études)	1,2	70	126
Debout, inactif	1,2	70	126
Activité légère, debout (magasin, établi, laboratoire)	1,6	93	167
Travail debout (ménage atelier)	2	116	209
Marche (4km/h)	2,8	162	292
Travail intensif (mécanique lourde)	3	174	313
Marche (5km/h)	3,4	197	354
Course (10km/h)	8	464	834

\* Par rapport à la surface du corps

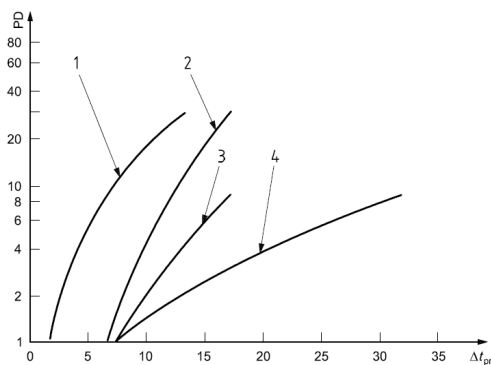
\*\* Valable pour une personne de 1.8m<sup>2</sup> de surface corporelle (par ex. taille 1.7m, poids 69kg) et on rajoute 1W/kg supplémentaire. On diminue de 20% pour les femmes et de 20 à 40% pour les enfants.

## A.2 Inconfort thermique local.

La neutralité thermique telle qu'elle est décrite par les indices PMV-PPD ou par la température opérative, n'est pas la seule exigence pour le confort thermique. La sensation de bien-être globale d'un individu peut être atténuée dès lors qu'une partie du corps est chaude et que l'autre est froide. C'est pourquoi une exigence supplémentaire de confort thermique est nécessaire, c'est-à-dire celle qui ne présente pas d'inconfort thermique local. Un inconfort local peut être causé par un champ de rayonnement asymétrique, un gradient vertical de la température de l'air, le contact avec un sol chaud ou froid, ou un courant d'air.

L'asymétrie de la température radiante.

L'asymétrie de la température radiante peut engendrer une sensation d'inconfort. Cette asymétrie est définie par la différence de température radiante moyenne entre les deux faces opposées d'une petite surface plane. Par exemple, un plafond chaud sera moins bien supporté qu'un plafond froid, alors qu'une paroi chaude sera préférée à une paroi froide.



**Fig. A-6 :** Inconfort thermique local causé par l'asymétrie de température de rayonnement (norme NF EN ISO 7730).

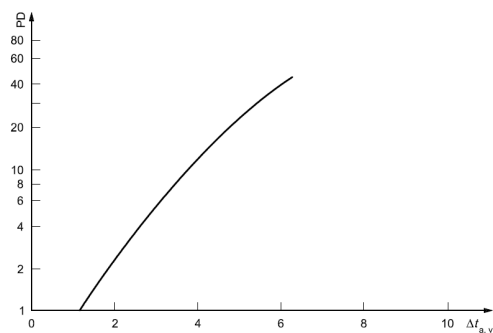
PD pourcentage d'insatisfaits, en %

$\Delta t_{pr}$  asymétrie de température de rayonnement, en °C

1. plafond chaud
2. mur froid
3. plafond froid
4. mur chaud

Gradient vertical de température.

Un gradient vertical de la température de l'air  $> 3^{\circ}\text{K}$  entre la tête (1,1m) et les pieds (0,1m), pour des personnes assises, génère un inconfort avec 10% d'insatisfaits (PD).



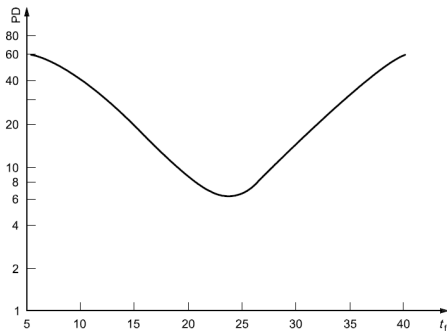
**Fig. A-7 :** Inconfort thermique local causé par la différence verticale de la température de l'air (norme NF EN ISO 7730).

PD Pourcentage d'insatisfait, en %

$\Delta t_{a,v}$  Différence verticale de la température de l'air entre la tête et les pieds, en °C

### La température du sol.

La température du sol crée un inconfort si le sol est trop chaud ou trop froid. Cette température est ressentie à travers les semelles des chaussures. Son effet est particulièrement important si l'on porte des chaussures légères. Pour une température au sol comprise entre 19°C et 29°C, le pourcentage d'insatisfait (PD) est  $\leq 10\%$ .



**Fig. A-8 :** Inconfort thermique local causé par des sols chauds ou froids (norme NF EN ISO 7730).

PD Pourcentage d'insatisfait, en %

$\Delta t_f$  Température du sol, en °C

### La sensation de courant d'air.

Tandis qu'à l'extérieur un courant d'air n'est pas considéré comme désagréable, et est parfois apprécié, le moindre courant d'air est mal perçu dans un espace clos. Les variations de la vitesse de l'air ont une influence significative sur la sensation de courant d'air perçue par une personne. Le pourcentage d'individu ressentant des courants d'air alors que, à vitesse d'air nulle, leur confort est idéal, dépend non seulement de la vitesse et de la température de l'air mais aussi de son degré de turbulence  $Tu$  (en %). La turbulence est le résultat du rapport de la Variation Standard de la vitesse de l'air ( $SD_{va}$ ) sur la vitesse moyenne de l'air ( $va$ ):

$$Tu = [SD_{va} / va].100$$

La vitesse de l'air par rapport au sujet varie en fonction du temps à cause de l'écoulement tourbillonnaire de l'air.

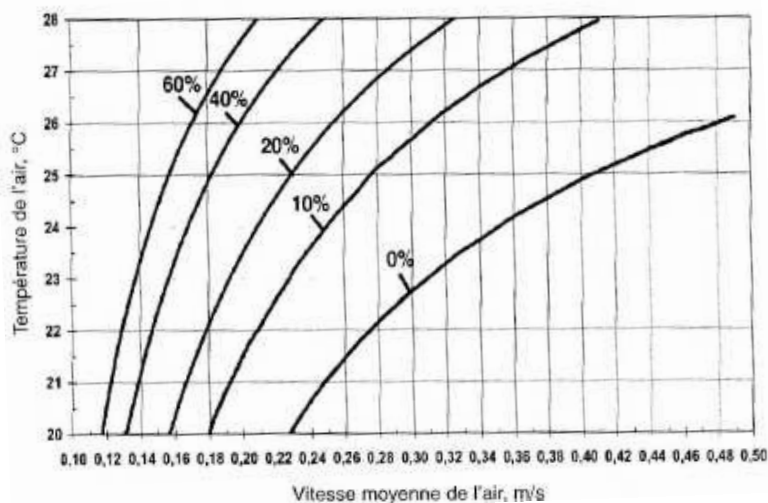
La sensation de courant d'air est la sensation la plus impopulaire auprès des usagers de la ventilation et de la climatisation. La vitesse de l'air dans un lieu influe sur les échanges de chaleur par convection entre une personne et l'ambiance. Cela influence le confort thermique du corps en général (perte de chaleur exprimé par les indices PMV et PPD) et l'inconfort thermique local (courants d'air).

En général, on évite de causer des courants d'air dont la vitesse excède 0,2 m/s dans la zone occupée. Il est même recommandé de ne pas dépasser 0,1 m/s. Il faut savoir qu'il est très difficile d'obtenir un écoulement d'air ayant moins de 20% de turbulence.

Il existe une relation empirique qui permet d'obtenir le taux d'insatisfaction (DR) des personnes dû à l'apparition de courants d'air et prenant en compte la température de l'air.

La norme ISO 7730 préconise **qu'au moins 80%** de la population ne soit pas incommodée par les courants d'air. Cela correspond à un **DR < 20%**.

La figure A-9 présente le rapport entre la vitesse moyenne de l'air, la température de l'air et le degré de turbulence pour un taux de courant d'air DR=15%.



**Fig. A-9 :** 15% d'insatisfaits à cause de l'apparition de courants d'air (taux à 15%) pour différentes températures de l'air, vitesses moyennes de l'air et degrés de turbulence. (Illustration Recknagel, *Génie climatique*, 2007, p52)

### A.3 Catégories d'ambiance thermique.

L'ambiance thermique souhaitée pour un type de lieu peut être sélectionnée parmi les trois catégories A (haute), B (moyenne), C (minimum), conformément au tableau A-10. Pour chaque catégorie, il convient de satisfaire simultanément l'ensemble des critères.

**Tableau A-10** : Catégories d'ambiance thermique (DIN CR 1752, NF EN ISO 7730)

Catégorie	Etat thermique du corps dans son ensemble		Inconfort local			
	PPD (%)	PMV	DR*(%)	PD (%) dû à		
				Un gradient vertical de température de l'air	Un sol chaud ou froid	Une asymétrie de la température de rayonnement
A	<6	-0,2<PMV<0,2	<10	<3	<10	<5
B	<10	-0,5<PMV<0,5	<20	<5	<10	<5
C	<15	-0,7<PMV<0,7	<30	<10	<15	<10

\* Pour la norme DIN CR 1752 les catégories sont 15%, 20%, 25%



## ***6.6 Comparatif des différents Labels et certification sur les critères de confort***

## Les paramètres mesurables liés au confort de la QAI

	HQE bureaux (ref 2008)			BREEAM Offices 2010			LEED New Construction 2009		
DEBIT D'AIR	cible 11 11.1	Garantie d'une ventilation efficace	débit minimal d'air: bureau= 25m3/h/pers. Salle de réunion = 30m3/h/pers.	Hea 8	Réduire les risques sanitaires associés à une mauvaise qualité de l'air	débit d'air : bureaux : 43.2 m3/h/pers	IEQ Credit 7.1: Thermal Comfort: Design IEQ Prerequisite 1: Minimum IAQ Performance	Etablir une température stimulant la productivité et assurant le confort et bien-être des occupants Satisfaire aux minimum requis selon ASHRAE 62.1-2004 concernant la qualité de l'air intérieur.	débit d'air (densité d'occupation connue) : bureau =9m3/h/pers + 1,08m3/h par m <sup>2</sup> circulation = 1,08m3/h par m <sup>2</sup> restaurant = 13,68m3/h/pers + 3,24m3/h par m <sup>2</sup>  débit d'air (densité d'occupation inconnue) : bureau = 30,6m3/h/pers ( densité d'occupation par défaut = 5pers/100m <sup>2</sup> ) circulation = 1,08m3/h par m <sup>2</sup> restaurant = 16,92m3/h/pers ( densité d'occupation par défaut = 100pers/100m <sup>2</sup> )
							IEQ Credit 2: Increased Ventilation	Offrir un système de ventilation additionnel pour améliorer le confort, le bien-être et la productivité des	débit d'air supérieur de 30% à celui déterminé en EQ Prerequisite 1 ou débit de ventilation naturelle défini au EQ prerequisite 1 pour 90% des espaces occupés
POLLUANTS	cible 13 13.2	Maîtrise des sources de pollution internes	TVOC (en µg/m3) : sol<1000 / mur<1000 - TP 1 point sol<250 / mur<500 - TP 2 points  formaldéhyde (en µg/m3): sol<62,5 / mur<125 - TP 1 point sol et mur < 40 - TP 2 points sol et mur < 20 - TP 3 points sol et mur < 10 - TP 4 points  cancérogène 1 et 2 (en µg/m3): <5 - TP 1 point <2,5 - TP 2 points <1 - TP 3 points  Radon < 400 Bq/m3 - en B < 200 Bq/m3 - en P <100 Bq/m3 - en TP	Hea 9 Volatile Organic Compounds	Favoriser un environnement intérieur sain en limitant les composés organiques volatils	cf normes européennes pour les émissions en polluants des matériaux	IEQ Credit 3.2 : Construction indoor air quality management plan - before occupancy	réduire les problèmes de la QAI résultant de la construction ou de la rénovation pour assurer un confort des occupants et des ouvriers	TVOC < 500 µg/m3  Formaldéhyde < 27 particules par milliards  PM10 < 50 µg/m3  4-Phenylcyclohexene < 6,5 µg/m3  monoxyde de carbone < 9µg/m3 et pas plus de 2µg/m3 par rapport au niveau extérieur
							IEQ Credit 4.1 IEQ Credit 4.2 IEQ Credit 4.3 IEQ Credit 4.4	Réduire la quantité de contaminants odorants, irritants ou néfastes pour le confort et le bien-être des occupants	cf tableaux des émissions en polluants des matériaux
FILTRE							IEQ Prerequisite 1: Minimum IAQ Performance  IEQ Credit 5: Indoor Chemical & Pollutant Source Control	Satisfaire aux minimum requis selon ASHRAE 62.1-2004 concernant la qualité de l'air intérieur.  minimiser l'exposition des occupants aux particules dangereuses ou chimiques	filtre MERV > 6 ( minimum efficiency reporting value)  filtre MERV > 13 pour les ventilations mécaniques

# Les paramètres mesurables liés au confort de la QAI

GIE Enjeu Energie Positive - Groupe de travail Confort et Performance des immeubles de bureaux BBC et BEPOS

	normes			Code du travail et code de la construction et réglementations			divers		
DEBIT D'AIR	EN 13779	La norme européenne NBN EN 13779 propose différents débits d'air neuf à respecter en fonction de la qualité de l'ambiance à respecter ainsi que le taux de CO2 à respecter.	débit d'air neuf en m3/h/pers. : qualité excellente : >54 qualité bonne : 36-54 qualité médiocre : 22-36 qualité basse < 22	C.Travail : Article R4222-6	article relatif à la ventilation mécanique	débit minimal d'air: bureau= 25m3/h/pers. Salle de réunion = 30m3/h/pers.			
POLLUANTS							OMS		10µg/m3 concentration max de PM2,5 pour diminuer les risques de maladies cardio-pulmonaires.  100Bq/m3 concentration max de Radon.
							arrêté du 19 avril	arrêté relatif à l'etiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils	exemple pour être classé A+ (en µg/m3) formaldéhyde < 10 Acétaldéhyde < 200 Toluène < 300 Tétrachloroéthylène < 250 Xylène < 200 1,2,4-triméthylbenzène < 1000 1,4-Dichlorobenzène < 60 Ethylbenzène < 750 2-Butoxyéthanol <1000 Styrène < 250 COVT < 1000

# Les paramètres mesurables liés au confort THERMIQUE

GIE Enjeu Energie Positive - Groupe de travail Confort et Performance des immeubles de bureaux BBC et BEPOS

	HQE bureaux (ref 2008)			BREEAM Offices 2010			LEED New Construction 2009		
TEMPERATURE	cible 8 8.1	Dispositions architecturales visant à optimiser le confort hygrothermique en hiver et en été	Ticref ( dans tous les cas Ticref < 26 °C)	Hea 10 Thermal Comfort	Assurer la bonne température aux moyens d'outils appropriés	température ambiante en hiver : 21-23 °C température ambiante en été : 22-24 °C  température du sol : 23 à 25 °C différence verticale de T° < 3 °C différence horizontale de T° < 10 °C  humidité relative: 40-70%	IEQ Credit 6.2: Controllability of Systems: Thermal Comfort	Offrir un control élevé de la température par un individu ou un groupe dans un espace multi-activités	température de l'air : 19 - 28 °C ( dépend de humidité absolue)  température du sol : 19 à 29 °C différence verticale de T° < 3 °C  humidité absolue < 0.012 (kg_eau/kg_airsec) pas de limite basse pour l'humidité humidité relative < 65%
VITESSE DE L'AIR	cible 8 8.2	Création de conditions de confort hygrothermique en hiver	En P Vitesse de l'air ≤ 0,20 m/s  En TP Vitesse de l'air ≤ 0,15 m/s				IEQ Credit 6.2: Controllability of Systems: Thermal Comfort	Offrir un control élevé de la température par un individu ou un groupe dans un espace multi-activités	vitesse de l'air < 0,8m/s
	cible 8 8.4	Création de conditions de confort hygrothermique en été dans les locaux ayant recours à un système de refroidissement	En P Vitesse de l'air ≤ 0,25 m/s  En TP Vitesse de l'air ≤ 0,22 m/s						

	normes		Code du travail et code de la construction et réglementations			
TEMPERATURE	EN ISO 7731	Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.	en bureau climatisé ( modèle de Fanger ) : T optimale = 22 ° En bureau ventilé (modèle adaptatif): hiver : 17<T<22 été : 25.5<T<30.5	C.Construction : article R 131-20		limite supérieure de chauffage : 19 °C limite inférieure de refroidissement : 26 °C
	EN 13779		température idéale: hiver avec chauffage : 19-24 été avec refroidissement : 23-26			
VITESSE DE L'AIR	EN 13779		vitesse de l'air (m/s): Température d'air locale = 20 °C : 0,1 à 0,16 Température d'air locale = 21 °C : 0,1 à 0,17 Température d'air locale = 22 °C : 0,11 à 0,18 Température d'air locale = 24 °C : 0,13 à 0,21 Température d'air locale = 26 °C : 0,15 à 0,25			

## 6.7 Article Human Factor: The Bottom Line

Extrait de: " Human Factor : The Bottom Line ; Adrian Leaman , Arup" in *Ecolibrium*, decembre 2009  
Fondé sur les travaux de « Usable Building Trust » et « Building Use studies »

### 5 éléments d'un immeuble de bureau pour des occupants satisfaits et productifs

#### Une réaction rapide

D'une façon générale, les occupants attendent de leur lieu de travail de répondre rapidement à leurs sollicitations : ajuster l'emplacement d'un écran, disposer d'un ascenseur, réparer une lampe. Plus précisément, lorsqu'ils agissent sur une commande du bâtiment telle que lumière, stores ou chauffage les occupants espèrent tout d'abord que l'utilisation en soit évidente. Ensuite, après action, il est nécessaire pour eux d'obtenir un retour rapide du système montrant bien la prise en compte de leur demande, par une indication sonore ou visuelle par exemple. Puis il doit être évident pour l'occupant que son action a eu un effet et si possible celui espéré. Enfin, l'occupant est nettement plus satisfait si il a une marge de manœuvre de réglage plutôt que d'être prisonnier d'un système complètement automatique qui lui interdit toute action

#### Réduire les inconforts

La mesure effective du confort par les utilisateurs se fait par le pourcentage d'insatisfaits (NDLR : voir ci après le fondement scientifique de ce constat). Même dans les meilleurs bâtiments, il reste toujours un pourcentage d'insatisfaits sur un aspect ou un autre du confort. Les occupants expriment ce qu'ils perçoivent de leur inconfort mais sont incapables de transformer leur inconfort en propriétés thermiques, acoustiques ou visuelles.

Le lien entre confort perçu et productivité est tellement fort que celle ci est incontestablement dépendante de celui là

#### Comprendre le mode d'emploi

Plus les occupants comprennent le fonctionnement pour lequel le bâtiment est conçu, plus ils seront indulgents en cas de disfonctionnement. En général, les concepteurs du bâtiment auront spontanément un raisonnement inverse. De fait, plus un organe de contrôle permet de comprendre intuitivement le fonctionnement du bâtiment, plus l'occupant sera satisfait ; et il ne faut jamais prendre pour acquis que tout un chacun sait comment fonctionne un ventilo convecteur par exemple

#### Eviter la sur-complexité ingérable

Les bâtiments modernes embarquent de plus en plus de fonctionnalités et les technologies associées. Les bureaux paysagers ont augmenté la dépendance entre le pilotage des différents équipements. A tel point que si on n'y prend pas garde dès le début de la conception et lors de la mise en œuvre, la meilleure technologie peut se révéler désastreuse à l'usage. Comme le résume la désormais célèbre citation d'un intégrateur : « nous vendons des rêves, mais pouvons installer des cauchemars ».

#### Veiller à la densité d'occupation

La tendance d'aménagement est à l'accroissement de la densité d'occupation. Il est souvent supposé que les bâtiments BBC sans conditionnement d'air et avec ventilation naturelle ont la même capacité d'utilisation (c'est-à-dire le nombre de personnes qui peuvent confortablement occuper une zone de bureau) que les autres bureaux. Ce point doit être soigneusement vérifié car le niveau de performance du bureau peut être très facilement dégradé par un léger accroissement de la densité d'occupation. Egalement, la disposition des postes de travail est un aspect essentiel à prendre en compte lors du « space planning » pour assurer un haut niveau de satisfaction des occupants, ainsi que des facilités de base telles que l'accès aux meubles de rangement, aux toilettes, et un accès ponctuel à des espaces privatif (confidentialité).

## **6.8 Confort Visuel : Etude ENTPE**

# COMPARAISON DE LA QUALITE PERÇUE D'ECLAIRAGES TERTIAIRES A TRES BASSE CONSOMMATION

## RESULTATS D'UNE CAMPAGNE MENEES SUR LE SIMULATEUR DE L'ENTPE

Auteurs:

Céline Villa, Thierry Sorèze, Marc Fontoynt, Raphaël Labayrade  
ENTPE-LASH  
Rue Maurice Audin  
69120 Vaulx-en-Velin

10 Décembre 2010

Client:

Bouygues Immobilier  
GIE Bâtiments à Energie Positive  
Responsable : Marie-Annick Lebars  
Directrice de l'innovation et du développement durable IE IDF

# SOMMAIRE

<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS .....</b>	<b>3</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>6</b>
<b>PARTIE I – SCENARI A EVALUER.....</b>	<b>7</b>
<b>PARTIE II – CREATION DES SIMULATIONS.....</b>	<b>10</b>
II-1.    MOTEUR DE RENDU MENTAL RAY .....	10
II-2.    ESPACES SIMULES .....	10
<b>PARTIE III - TEST PSYCHOVISUELS.....</b>	<b>14</b>
III-1.   PANEL D'OBSERVATEURS.....	14
III-2.   PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	14
<b>PARTIE IV – RESULTATS DE L'ETUDE .....</b>	<b>16</b>
IV-1.   PRINCIPAUX RESULTATS.....	16
a. <i>Bureau simple</i> .....	17
b. <i>Bureau double</i> .....	18
IV-2.   DESCRIPTION DETAILLEE DE L'ANALYSE STATISTIQUE .....	19
a. <i>Bureau simple</i> .....	19
b. <i>Bureau double</i> .....	23
IV-3.   RECHERCHE DES RAISONS POUR LESQUELLES LES OBSERVATEURS ONT EXPRIME LEURS PREFERENCES.....	27
a. <i>Bureau simple</i> .....	28
b. <i>Bureau double</i> .....	31
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>35</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>36</b>
ANNEXE 1 : SCENARI ET SIMULATIONS CORRESPONDANTES .....	37
ANNEXE 2 : DONNEES SUR LES SCENARI – BUREAU SIMPLE (FLUX, ECLAIREMENT, UNIFORMITE, CONSOMMATION) .....	42
ANNEXE 3 : DONNEES SUR LES SCENARI – BUREAU DOUBLE (FLUX, ECLAIREMENT, UNIFORMITE, CONSOMMATION).....	43



## TABLE DES ILLUSTRATIONS

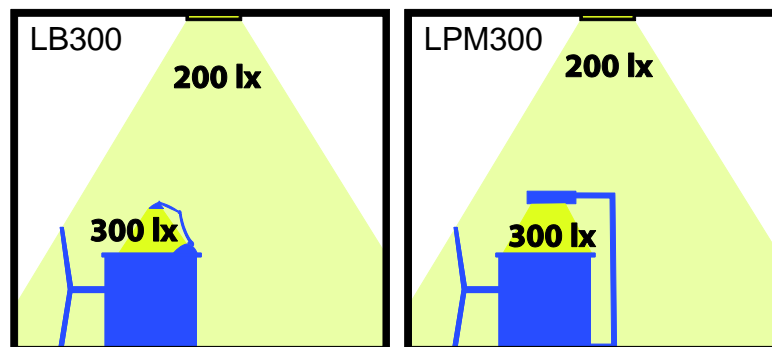
<b>FIGURE 1</b> : SCENARII ADAPTES ET EFFICACES AVEC UN ECLAIREMENT MOYEN SUR LA ZONE DE TRAVAIL ELEVE.....	4
<b>FIGURE 2</b> : SCENARII ADAPTES ET EFFICACES AVEC UNE UNIFORMITE SUR LA ZONE DE TRAVAIL ELEVEE.....	4
<b>FIGURE 3</b> : CALEPINAGE DU BUREAU DOUBLE .....	12
<b>FIGURE 4</b> : SIMULATEUR DE REALITE VIRTUELLE UTILISE POUR LE TEST PSYCHOVISUEL .....	14
<b>FIGURE 5</b> : CONSOMMATION ET PREFERENCES DES DIFFERENTS SCENARII DU BUREAU SIMPLE .....	17
<b>FIGURE 6</b> : SCENARII DU BUREAU SIMPLE PREFERES PAR LES OBSERVATEURS CONSOMMANT LE MOINS .....	17
<b>FIGURE 7</b> : CONSOMMATION ET PREFERENCES DES DIFFERENTS SCENARII DU BUREAU DOUBLE.....	18
<b>FIGURE 8</b> : SCENARII DU BUREAU DOUBLE PREFERES PAR LES OBSERVATEURS CONSOMMANT LE MOINS.....	18
<b>FIGURE 9</b> : RESULTATS DE LA CAH. (A) DENDROGRAMME (B) INDICE DE QUALITE – BUREAU SIMPLE .....	19
<b>FIGURE 10</b> : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES VALEURS DE MERITE NORMALISEES ET DES INTERVALLES DE CONFIANCE – BUREAU SIMPLE.....	20
<b>FIGURE 11</b> : SCENARII DU BUREAU SIMPLE LES PLUS ADAPTES (PREFERENCE > 8/10).....	21
<b>FIGURE 12</b> : SCENARII DU BUREAU SIMPLE JUGES LES MOINS ADAPTES .....	22
<b>FIGURE 13</b> : RESULTATS DE LA CAH. (A) DENDROGRAMME (B) INDICE DE QUALITE – BUREAU DOUBLE.....	23
<b>FIGURE 14</b> : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES VALEURS DE MERITE NORMALISEES ET DES INTERVALLES DE CONFIANCE – BUREAU DOUBLE.....	24
<b>FIGURE 15</b> : SCENARII DU BUREAU DOUBLE LES PLUS ADAPTES (PREFERENCE > 7,5/10).....	25
<b>FIGURE 16</b> : SCENARII DU BUREAU DOUBLE JUGES LES MOINS ADAPTES.....	26
<b>FIGURE 17</b> : ESPACE DES DIMENSIONS 1 ET 2 DE L'ANALYSE MULTIDIMENSIONNELLE – BUREAU SIMPLE .....	30
<b>FIGURE 18</b> : ESPACE DES DIMENSIONS 1 ET 2 DE L'ANALYSE MULTIDIMENSIONNELLE – BUREAU DOUBLE.....	33
<b>FIGURE 19</b> : SIMULATIONS DES BUREAUX.....	37
<b>TABLEAU 1</b> : SCENARII ETUDIES POUR LE BUREAU SIMPLE.....	8
<b>TABLEAU 2</b> : SCENARII ETUDIES POUR LE BUREAU DOUBLE .....	9
<b>TABLEAU 3</b> : CARACTERISTIQUES DES SOURCES LUMINEUSES.....	11
<b>TABLEAU 4</b> : FLUX DES SOURCES EN FONCTION DES SCENARII .....	13
<b>TABLEAU 5</b> : VALEURS DE MERITE NORMALISEES ET INTERVALLE DE CONFIANCE – BUREAU SIMPLE .....	20
<b>TABLEAU 6</b> : GROUPES DE SOLUTIONS NON SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENTES – BUREAU SIMPLE .....	22
<b>TABLEAU 7</b> : VALEURS DE MERITE NORMALISEES ET INTERVALLE DE CONFIANCE – BUREAU DOUBLE.....	24
<b>TABLEAU 8</b> : GROUPES DE SOLUTIONS NON SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENTES – BUREAU DOUBLE.....	26
<b>TABLEAU 9</b> : COORDONNEES DES SCENARII DANS L'ESPACE DE PREFERENCE – BUREAU SIMPLE.....	28
<b>TABLEAU 10</b> : COORDONNEES DES SCENARII DANS L'ESPACE DE PREFERENCE – BUREAU DOUBLE.....	31
<b>TABLEAU 11</b> : DONNEES SUR LES SCENARII – BUREAU SIMPLE.....	42
<b>TABLEAU 12</b> : DONNEES SUR LES SCENARII – BUREAU DOUBLE .....	43

## RESUME

Ce rapport présente les résultats d'une étude menée pour le compte du GIE Bâtiments à énergie positive. Il s'agit d'évaluer la qualité et le confort fourni par des scénarii d'éclairage de bureau économes en énergie. Un panel de 30 observateurs a comparé différents scénarii deux à deux et identifié les plus adaptés pour travailler. Les tests ont été menés sur deux configurations : un bureau simple individuel et un bureau double.

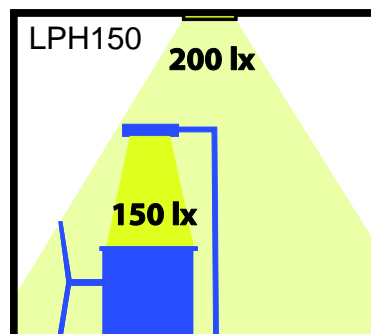
D'après l'analyse des résultats, quelque soit la configuration, bureau simple ou double, **les scénarii les plus adaptés pour travailler et les plus économes en énergie ( $< 3,7W/m^2$ )** présentent :

- **Soit une zone de travail avec un éclairement moyen élevé et légèrement uniforme :** scénarii avec 200 lux d'éclairement moyen sur le plan utile fourni par l'éclairage plafonnier + 300 lux d'éclairement moyen sur la zone de travail fourni par la lampe d'appoint à 1m20 du sol (Figure 1);



**Figure 1 :** Scénarii adaptés et efficaces  
avec un éclairement moyen sur la zone de travail élevé

- **Soit une zone de travail avec un éclairement moyen légèrement plus faible mais une uniformité élevée :** scénarii avec 200 lux d'éclairement moyen sur le plan utile fourni par l'éclairage plafonnier + 150 lux d'éclairement moyen sur la zone de travail fourni par la lampe d'appoint à 1m20 du sol (Figure 2).



**Figure 2 :** Scénarii adaptés et efficaces  
avec une uniformité sur la zone de travail élevée

## Rapport d'éclairage

Par ailleurs, quelque soit la configuration, bureau simple ou double, les participants ont pris en compte dans leur jugement :

- en priorité l'éclairage moyen sur la zone de travail ;
- puis l'uniformité sur la zone de travail.

Dans le cas du bureau simple individuel, présentant une surface plus petite (15,5 m<sup>2</sup>), deux autres facteurs, moins influents que l'éclairage et l'uniformité de la zone de travail, ont aussi été pris en compte dans les jugements :

- la luminosité de la zone de fond (éclairage horizontal et vertical) ;
- et enfin la présence d'une lampe d'appoint dans le champ de vision et son esthétique.

**Pour obtenir un éclairage de bureau adapté et confortable en présence de luminaires plafonniers fournissant 200 voire 300 lux d'éclairage moyen sur le plan utile, l'utilisation d'une lampe appoint est vivement recommandée avec un apport supplémentaire minimum de 150 lux sur la zone de travail.**

L'uniformité sur la zone de travail augmente avec la hauteur de la lampe d'appoint. Cependant, le flux à fournir pour obtenir un éclairage donné est plus important avec une lampe d'appoint plus haute nécessitant une consommation électrique plus élevée. De plus, la probabilité que la source apparaisse dans le champ de vision de l'utilisateur augmente avec la hauteur du luminaire : il faudra être vigilant à la position de la lampe d'appoint pour limiter les éblouissements d'inconfort et d'incapacité.

## INTRODUCTION

Dans le cadre du GIE Bâtiments à Energie positive, il est proposé des solutions d'éclairage répondant à trois objectifs principaux :

- Garantir une consommation d'énergie réduite ;
- Assurer la flexibilité (adaptation aux divers aménagements);
- Garantir un éclairage de qualité assurant un confort visuel optimum pour les occupants.

Le GIE a déjà identifié des scénarii d'éclairage efficaces qui doivent à présent être validés d'un point de vue du confort de l'occupant. Pour les immeubles de bureaux, Bouygues Immobilier souhaite livrer un espace vide, d'éclairement moyen sur le plan utile de 200 ou 300 lux et une uniformité de 0.6. Cependant, le cahier des charges transmis à la livraison doit fournir des préconisations sur le matériel et les aménagements souhaitables pour garantir un éclairage confortable et de qualité.

L'usage d'une lampe d'appoint, type lampadaire ou lampe de bureau, est envisagé, en particulier pour permettre de satisfaire à la norme européenne EN 12464-1. Toutefois, des tests psychovisuels doivent être menés pour, d'une part valider la valeur ajoutée de la lampe d'appoint sur la qualité de l'éclairage, et d'autre part, définir les caractéristiques des scénarii d'éclairage préférés : Quel type de lampe d'appoint ? Quelle uniformité sur le bureau ? Quel éclairement moyen sur le bureau ?

Pour répondre à ces problématiques, des tests psychovisuels ont été menés sur 2 configurations (bureau simple, bureau double) au Laboratoire des Sciences de l'Habitat (LASH). Des simulations, représentant les différents scénarii d'éclairage de bureau, ont d'abord été créées, puis jugées par un panel d'observateurs. Pendant le test, les simulations étaient projetées en trois dimensions grâce au simulateur stéréoscopique de réalité virtuelle du LASH. Les observateurs étaient alors invités à comparer deux à deux les scènes qui leur étaient présentées.

## PARTIE I – SCENARII A EVALUER

Bouygues Immobilier s'engage à livrer un éclairage moyen sur le plan utile de 200 lux ou 300 lux à vide (Evide). Le cahier des charges fourni par Bouygues doit comporter des préconisations, notamment sur l'éclairage d'appoint, pour assurer un niveau de confort visuel sur la zone de travail. Des scenarii d'éclairage composés d'une source plafonnière assurant un éclairage moyen sur le plan utile de 200 lux et une source d'appoint seront testés. Plusieurs paramètres de la source d'appoint seront évalués :

- **L'éclairage moyen supplémentaire sur la zone de travail** fourni par la lampe d'appoint en complément de la source plafonnière (E moy bureau) : 50/150/300 lux ;
- **Le choix du luminaire d'appoint** : lampe de bureau (LB) / lampe sur pied (LP) ;
- **La hauteur du luminaire** permettant d'obtenir : une répartition plus uniforme sur la zone de travail/une tâche plus petite centrée sur la zone de travail;

La hauteur de la lampe d'appoint sera testée uniquement dans les scenarii avec une lampe sur pied : en position haute (H) à 1m80 du sol, ou à une hauteur moyenne (M) à 1m20 du sol.

Un scénario 100% appoint assurant un éclairage moyen de 300 lux sur la zone de travail a été suggéré par Monsieur Clément Jacquemaire, Bouygues Immobilier, dans son mail du 06/08/10. Pour prendre en compte ce scénario dans l'étude et pour des raisons d'uniformité, un scénario avec un lampadaire direct/indirect sera testé. Conformément à la demande, la composante directe du lampadaire assure un éclairage moyen de 300 lux sur la zone de travail. La composante indirecte produit un éclairage moyen de 200 lux sur le plan utile afin d'assurer une uniformité supérieure à 0,6 sur la zone de travail (conformément à la norme EN12464-1).

Les différents scenarii testés dans l'étude sont décrits Tableau 1 pour le Bureau Simple (BS) et Tableau 2 pour le Bureau Double (BD). Les scenarii et leurs simulations sont en Annexe 1.

## BUREAU SIMPLE – POINT DE VUE : POSTE DE TRAVAIL

23/08/2010

	Configuration	Lampe d'appoint*	Hauteur /r sol**	Evide(lux)***	Emoy bureau(lux)****
1	BS-Ref 300	N/A	N/A	300	0
2	BS Ref 200	N/A	N/A	200	0
3	BS-LPH50	Lampe sur pied	1,80 m	200	50
4	BS-LPH150	Lampe sur pied	1,80 m	200	150
5	BS-LPH300	Lampe sur pied	1,80 m	200	300
6	BS-LPM50	Lampe sur pied	1,20 m	200	50
7	BS-LPM150	Lampe sur pied	1,20 m	200	150
8	BS-LPM300	Lampe sur pied	1,20 m	200	300
9	BS-LB50	Lampe de bureau	1,20 m	200	50
10	BS-LB150	Lampe de bureau	1,20 m	200	150
11	BS-LB300	Lampe de bureau	1,20 m	200	300
12	BS-LPDI	Lampe sur pied direct indirect	1,80 m	0*****	200+300

<u>NOM DES CONFIGURATIONS</u>
<b>BS</b> : Bureau simple
<b>LPM</b> : Lampe sur pied à 1m20 du sol
<b>LPH</b> : Lampe sur pied à 1m80 du sol
<b>LB</b> : Lampe de Bureau
<b>LPDI</b> : Lampadaire sur pied Direct(300lux)/Indirect (200lux)
<b>Ref200/Ref300</b> : Eclairage plafonnier fournissant un éclairage moyen sur le plan utile de 200/300 lux
<b>50</b> : Eclairage moyen sur la zone de travail supplémentaire de 50 lux par rapport à la solution de référence Ref200.

\*Lampe d'appoint = type de lampe d'appoint

\*\*Hauteur /r sol = Hauteur du point lumineux de la lampe d'appoint par rapport au sol

\*\*\*Evide (lux) = Eclairage moyen reçu sur le plan utile dans la pièce vide par l'éclairage plafonnier livrée par Bouygues

\*\*\*\*Emoy bureau (lux) = Eclairage moyen reçu sur la zone de travail par la lampe d'appoint (EN 12464-1)

\*\*\*\*\*d'après la proposition du 6/08/10 de Monsieur Clément Jacquemaire, Bouygues Immobilier :

LPDI : luminaire sur pied direct/indirect dont :

- la composante indirecte permet d'obtenir 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile ;
- la composante directe permet d'obtenir 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail.

**TABLEAU 1 : SCENARII ETUDIÉS POUR LE BUREAU SIMPLE**

## BUREAU DOUBLE – POINT DE VUE : POSTE DE TRAVAIL 1

23/08/2010

	Configuration	Lampe d'appoint*	Hauteur /r sol**	Evide(lux)***	Emoy bureau(lux)****
1	BD-Ref 300	N/A	N/A	300	0
2	BD Ref 200	N/A	N/A	200	0
3	BD-LPH50	Lampe sur pied	1,80 m	200	50
4	BD-LPH150	Lampe sur pied	1,80 m	200	150
5	BD-LPH300	Lampe sur pied	1,80 m	200	300
6	BD-LPM50	Lampe sur pied	1,20 m	200	50
7	BD-LPM150	Lampe sur pied	1,20 m	200	150
8	BD-LPM300	Lampe sur pied	1,20 m	200	300
9	BD-LB50	Lampe de bureau	1,20 m	200	50
10	BD-LB150	Lampe de bureau	1,20 m	200	150
11	BD-LB300	Lampe de bureau	1,20 m	200	300
12	BD-LPDI	Lampe sur pied direct indirect	1,80 m	0*****	200+300

<b>NOM DES CONFIGURATIONS</b>
<b>BD</b> : Bureau double
<b>LPM</b> : Lampe sur pied à 1m20 du sol
<b>LPH</b> : Lampe sur pied à 1m80 du sol
<b>LB</b> : Lampe de Bureau
<b>LPDI</b> : Lampadaire sur pied Direct(300lux)/Indirect (200lux)
<b>Ref200/Ref300</b> : Eclairage plafonnier fournissant un éclairage moyen sur le plan utile de 200/300 lux
<b>50</b> : Eclairage moyen sur la zone de travail supplémentaire de 50 lux par rapport à la solution de référence Ref200.

\*Lampe d'appoint = type de lampe d'appoint

\*\*Hauteur /r sol = Hauteur du point lumineux de la lampe d'appoint par rapport au sol

\*\*\*Evide (lux) = Eclairage moyen reçu sur le plan utile dans la pièce vide par l'éclairage plafonnier livrée par Bouygues

\*\*\*\*Emoy bureau (lux) = Eclairage moyen reçu sur la zone de travail par la lampe d'appoint (EN 12464-1)

\*\*\*\*\*d'après la proposition du 6/08/10 de Monsieur Clément Jacquemaire, Bouygues Immobilier :

LPDI : luminaire sur pied direct/indirect dont :

- la composante indirecte permet d'obtenir 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile ;
- la composante directe permet d'obtenir 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail.

### TABLEAU 2 : SCENARII ETUDIES POUR LE BUREAU DOUBLE

## PARTIE II – CREATION DES SIMULATIONS

### II-1. MOTEUR DE RENDU MENTAL RAY

Le choix de l'outil de simulation d'éclairage s'est porté sur Mental Ray, logiciel développé par Mental Images (filiale de Nvidia). Ce choix s'est fait en raison de la souplesse d'utilisation et de l'intégration parfaite de Mental Ray dans 3ds Max Design avec lequel nous avons modélisé les espaces en 3D. De plus, Mental Ray utilise des algorithmes robustes de simulation de la lumière tels que le Photon Mapping et le Final Gathering. En outre, ce logiciel propose une excellente qualité de rendu d'image photo-réaliste ce qui permet son usage pour des tests psychovisuels.

L'implémentation de Mental Ray dans 3ds Max Design dispose d'outils complémentaires destinés à la simulation d'éclairage physiquement correcte : support du Near Field Photometry, données photométriques des luminaires, modèles de ciel robustes (CIE, Perez), modules d'analyse photométrique permettant de mesurer des quantités physiques (éclairage, luminance, facteur de lumière du jour).

Enfin, Mental Ray a récemment fait l'objet de deux publications [Reinhart et al., 2009] [Labayrade, 2009] soulignant sa validité dans le domaine de la simulation physiquement correcte de l'éclairage pour les applications liées au bâtiment.

### II-2. ESPACES SIMULES

#### a. MATERIAUX ET MOBILIER

Deux espaces de travail correspondant à un bureau simple et un bureau double ont été simulés. Le mobilier installé est issu de la gamme SteelCase. Les espaces comportent un ou deux poste(s) de travail selon la configuration, des meubles de rangement, ainsi qu'un espace de réunion.

Les cloisons, de marque Clestra, sont de couleur claire (blanc ou crème) afin d'obtenir un facteur de réflexion élevé. Le faux plafond acoustique est aussi de couleur claire, tandis que le sol est recouvert de moquette.

Les facteurs de réflexion  $\rho$  du local sont les suivants :

- Plafond :  $\rho = 0.7$  ;
- Murs :  $\rho = 0.7$  ;
- Sol :  $\rho = 0.3$ .

#### b. SOURCES LUMINEUSES

Les luminaires simulés dans les différents scénarii d'éclairage sont composés de produits réels (Philips TBS 460 28W, Philips TBS 411 21W) et de lampes imaginées pour les besoins des simulations. Le Tableau 3 récapitule les principales caractéristiques techniques des sources utilisées lors des simulations. Ces données techniques doivent permettre la prescription de sources lumineuses à utiliser dans un cas réel pour approcher les résultats obtenus lors de cette étude.



	Luminaires plafond 200 lux	Luminaires plafond 300 lux	Lampe de bureau	Lampadaire sur pied Phillips 1m20	Lampadaire sur pied Philips 1m80	Luminaire sur pied direct/indirect
Sources	Tube fluorescent	Tube fluorescent	LED	LED	LED	LED
Puissance (en W)	21 24,5 (avec pertes ballasts)	28 32,5 (avec pertes ballasts)	12 W pour 660 lm (gradable)	12W pour 660 lm (gradable)	12W pour 660 lm (gradable)	60W (voir § écrit)
Flux (en lm)	1900	2600	variable (cf Tableau 4)	variable (cf Tableau 4)	variable (cf Tableau 4)	3700 indirect 1100 ou 1250 direct (cf. Tableau 4)
TC (en K)	4000	4000	3000	3000	3000	4000
IRC	>85	>85	>80	>80	>80	>85
Angle	N/A	N/A	2 x 45°	2 x 45°	2 x 45°	Lambertien
Angle solide	1.956sr	2.175sr	1.88sr	1.88sr	1.88sr	Lambertien
Lumen output	0.89*	0.92*	0.95	0.95	0.95	1

\* : dépend de l'optique.

**Tableau 3:** Caractéristiques des sources lumineuses

#### Luminaires encastrés Phillips TBS 460 et TBS 411

Les luminaires encastrés, Philips TBS 460 28W et TBS 411 21W, composés de tubes fluorescents de type T5, constituent l'éclairage plafonnier des bureaux simulés, exceptés pour la solution directe-indirecte. Les luminaires TBS460 (resp. TBS411) fournissent un éclairage moyen sur le plan utile de 300 lux (resp. 200 lux).

#### Lampe de bureau à LED

Le design de la lampe de bureau a été créé pour la simulation. D'autres lampes de bureau pourront convenir dans un bureau réel. En revanche, les caractéristiques photométriques des LEDs Philips Luxeon rebel white ont été modélisées. Cette source présente une photométrie proche du LuxSpace Micro Blanc chaud (660 lm, 12W, 3000K) et est gradable. Ces caractéristiques sont répertoriées dans le Tableau 3 et fournissent une base pour le choix d'une source complémentaire pour la zone de travail.

#### Lampadaires à LEDs sur pied 1m20 et 1m80

Les luminaires à LEDs sur pied ont été simulés sur la base d'un produit existant de Philips. Deux variantes ont été proposées : une lampe sur pied d'1m80 de hauteur, proche du produit existant, et une lampe sur pied d'1m20 de hauteur dont les propriétés photométriques sont identiques à

la solution lampe de bureau. La source est un LuxSpace Micro Blanc chaud (660 lm, 12W, 3000K). L'intérêt de ces lampadaires est leur facilité de contrôle par commande ; ce qui permet d'envisager par exemple une adaptation du flux en fonction de la lumière du jour.

#### Lampadaires à LEDs sur pied 1m80 direct-indirect

Ce luminaire présente une composante directe fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail et une composante indirecte fournissant 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile. Il se substitue à l'éclairage général de type fluorescent encastré.

Le flux direct est produit par un maillage de LEDs de modèle LXM3-PW51 issues de la gamme Philips Luxeon Rebel white diffusées via une plaque diffusante de façon à produire un éclairage doux et non dommageable pour les yeux. Le flux indirect est produit de la même façon avec cependant une puissance accrue. Le maillage est constitué de 60 Leds, 40 pour le flux indirect et 20 pour le flux direct. Chacune de ces LEDs ayant une consommation électrique d'environ 1W, la consommation totale du luminaire a été estimée à 60W hors alimentation. Sa température de couleur a été fixée à 4000K. Comme les autres sources LEDs, ce luminaire devrait être pilotable et gradable.

#### c. CALEPINAGE

Les bureaux doubles de 23 m<sup>2</sup> (4.05 x 5.75, HSP : 2.70) sont constitués de 3 trames de 1m35 de large. Chaque trame est équipée d'un appareil encastré. Les luminaires sont installés en quinconce comme représentés sur la Figure 3.

Les bureaux simples de 15.5 m<sup>2</sup> (2.70 x 5.75, HSP : 2.70) ne comportent que 2 trames de 1m35 avec un appareil par trame installé en quinconce.



**Figure 3:** Calepinage du bureau double

d. *CALCUL DES FLUX*

Les flux des sources simulées ont été calculés pour apporter 50, 150 ou 300 lux d'éclairage moyen supplémentaire sur la zone de travail de 0.36m<sup>2</sup>, mais aussi pour garantir une bonne uniformité sur cette même zone.

Les calculs ont été effectués en prenant en compte les propriétés optiques et photométriques des sources simulées dans les scènes ainsi que les caractéristiques des pièces (dimensions, facteurs de réflexion). Ces flux ne sont donc valables que pour des configurations similaires à celles qui ont été simulées par nos soins. Nous les indiquons dans le Tableau 4.

	Eclairage moyen supplémentaire sur zone de travail(en lux)	Bureau simple Flux (en lm)	Bureau double Flux (en lm)
Tube fluo pour 200 lux à vide	0	1900*2	1900*3
Tube fluo pour 300 lux à vide	0	2600*2	2600*3
Lampe de bureau	50	25	25
	150	72	72
	300	144	144
Lampadaire sur pied	50	110	110
	150	344	344
	300	689	689
Lampadaire sur pied direct/indirect	Composante directe 300 lux	1100	1250
	Composante indirecte 200 lux (Emoy plan utile)	3700	3700

**Tableau 4** : Flux des sources en fonction des scenarii

Toutes les simulations sont jointes au rapport en Annexe 1.

## PARTIE III - TEST PSYCHOVISUELS

### III-1. PANEL D'OBSERVATEURS

30 personnes ont participé au test dont 18 salariés – 8 personnes ayant une activité administrative, 3 ingénieurs de recherche/technicien et 7 doctorants – et 12 étudiants de l'ENTPE. La tranche d'âge s'étale entre 20 et 57 ans :

- 16 personnes ont moins de 25 ans ;
- 5 personnes ont entre 26 et 35 ans ;
- 3 personnes ont entre 36 et 45 ans ;
- 6 personnes ont plus de 46 ans.

Trois étudiants ont suivi les cours d'éclairagisme à l'ENTPE. Quatre personnes du panel sont expertes dans le domaine de l'éclairage (2 doctorants et 2 ingénieurs de recherche). 70% des participants portent des lunettes. 60% du panel a déjà effectué au moins un test psychovisuel dans le simulateur et est donc initié au protocole expérimental. Une heure était allouée à chaque personne pour l'ensemble du test. La majorité des participants a effectué le test en une durée comprise entre 35 et 55 minutes. Au total, la période de test a duré une semaine. Les quatre personnes expertes et les trois étudiants initiés n'obtiennent pas de résultats différents par rapport à l'ensemble du panel.

### III-2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le test psychovisuel se déroulait devant le simulateur stéréoscopique de réalité virtuelle du LASH sur lequel étaient projetées en trois dimensions des simulations représentant les différents scenarii à juger.

Le simulateur de Réalité Virtuelle de l'ENTPE, illustré sur la Figure 4, permet d'afficher des images en trois dimensions (projection stéréoscopique à partir de deux vidéoprojecteurs en lumière polarisée). Les images affichées, d'une résolution de 1024 x 768 pixels, mesurent 1.68 x 1.26 m. La dynamique du simulateur au milieu de l'écran vaut 169,4 cd/m<sup>2</sup> (170 cd/m<sup>2</sup> (luminance d'une image blanche) – 0,6 cd/m<sup>2</sup> (luminance d'une image noire)). L'observateur était placé à 2,63 m de l'écran.



**Figure 4:** Simulateur de Réalité Virtuelle utilisé pour le test psychovisuel

Au début du test, il était demandé au participant de s'imaginer en train de travailler au bureau représenté sur les simulations projetées en trois dimensions. Le participant devait observer et juger deux séries de 66 paires d'images à comparer. Chaque série de paires affichait toutes les comparaisons possibles entre les 12 scénarii d'une scène donnée (Bureau simple ou Bureau double). Pour chaque paire, le participant devait choisir entre une image A et une image B en répondant à la question suivante :

**« Quelle ambiance lumineuse vous paraît la plus adaptée pour travailler? »**

Le participant annonçait à haute voix ses réponses pour que l'expérimentateur puisse les enregistrer au fur et à mesure sur un ordinateur. Le participant avait la possibilité de faire défiler librement chaque comparaison grâce aux flèches du clavier. Il pouvait ainsi observer les deux images composant chaque paire à volonté. L'ordre d'apparition des paires était différent pour chaque sujet et a été obtenu par un tirage aléatoire. De plus, la moitié de l'effectif a commencé par la série présentant le bureau simple tandis que l'autre moitié a commencé par le bureau double.

## PARTIE IV – RESULTATS DE L'ETUDE

Cette partie est divisée en trois sections. Les principaux résultats sont d'abord résumés dans la section IV-1. Les analyses statistiques permettant d'obtenir les résultats sont détaillées section IV-2. Enfin, dans la section IV-3, nous mettons en évidence les priorités à respecter pour obtenir un éclairage de bureau de qualité via des études de corrélations entre les préférences des observateurs et des grandeurs physiques (éclairage, uniformité, ...).

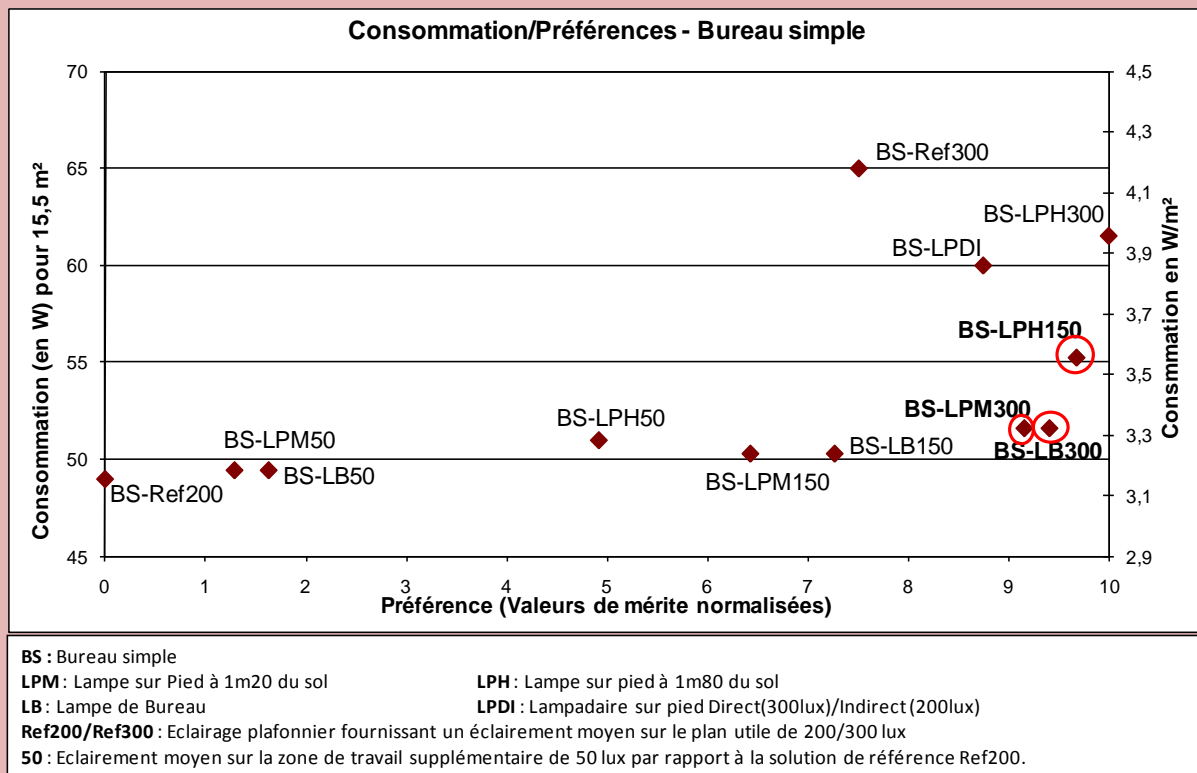
### IV-1. PRINCIPAUX RESULTATS

Les analyses statistiques permettent de calculer **une valeur de mérite pour chaque scénario qui retranscrit de manière quantitative la préférence moyenne du panel d'observateurs**. Les valeurs de mérite les plus élevées correspondent aux scénarii préférés. Les Figures 5 (resp. Figure 7) permet de situer chaque scénario du bureau simple (resp. du bureau double) en fonction de sa consommation (en Watts) et sa valeur de mérite entre 0 (pour les scénarii jugés les moins adaptés) et 10 (pour les scénarii jugés les plus adaptés par les observateurs).

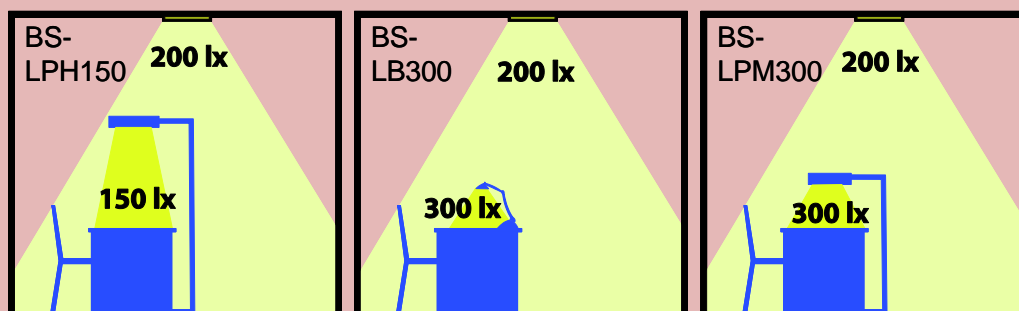
*a. BUREAU SIMPLE*

Parmi les scenarii ayant obtenu une valeur de mérite supérieure à 8/10, les scenarii qui consomment le moins sont (voir Figure 6) :

- BS-LPH150 : le lampadaire sur pied à 1m80 du sol fournissant 150 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile fourni par l'éclairage plafonnier (Consommation 55.25 W, Valeur de mérite 9.68/10) ;
- BS-LB300 : la lampe de bureau fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile fourni par l'éclairage plafonnier (Consommation 51.62 W, Valeur de mérite 9.41/10) ;
- BS-LPM300 : le lampadaire sur pied à 1m20 du sol fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile fourni par l'éclairage plafonnier (Consommation 51.62 W, Valeur de mérite 9.16/10) .



**Figure 5 :** Consommation et préférences des différents scenarii du bureau simple

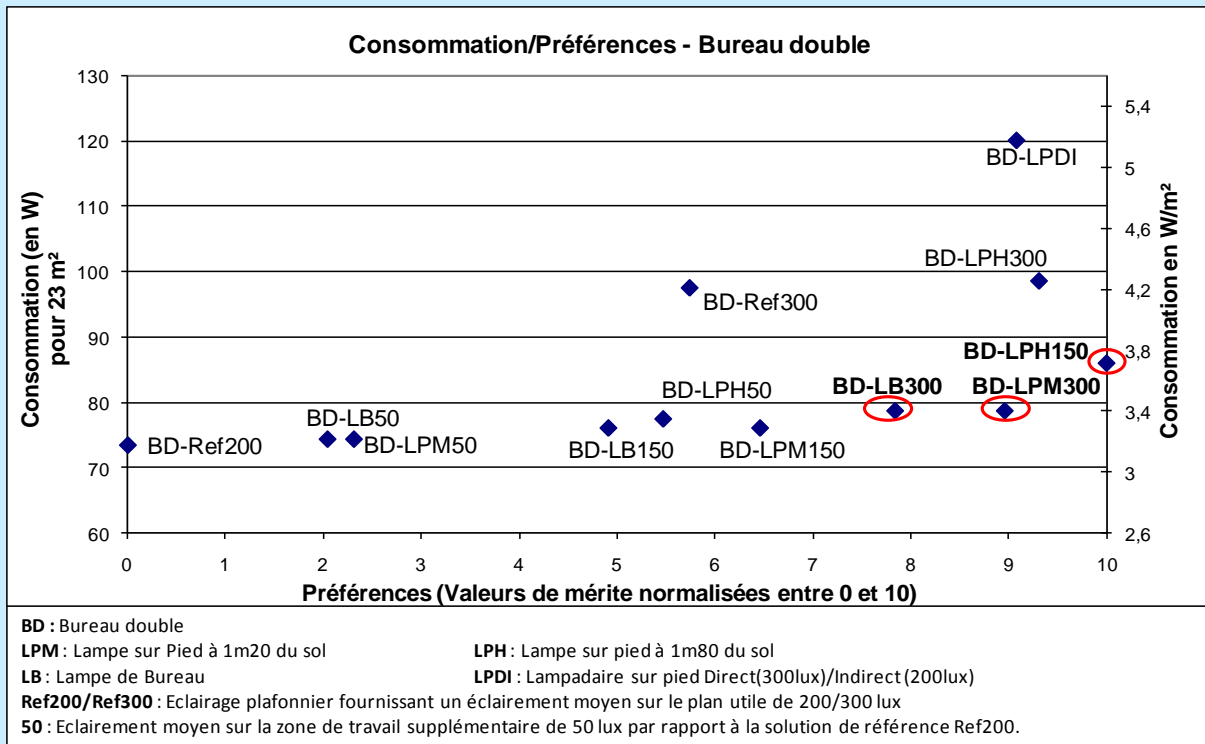


**Figure 6 :** Scenarii du Bureau Simple préférés par les observateurs consommant le moins

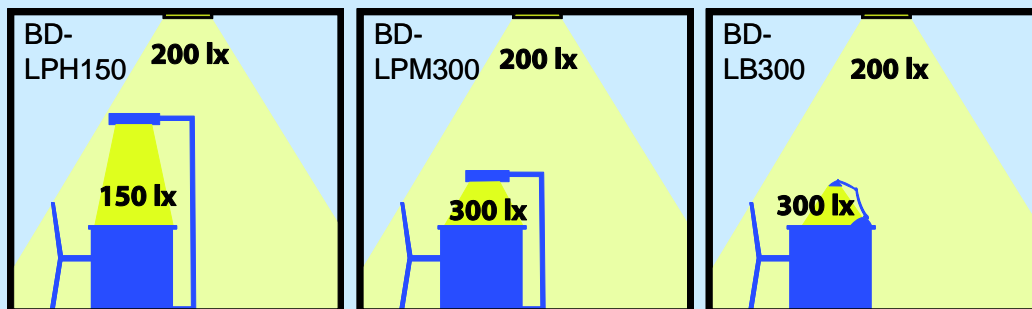
*b. BUREAU DOUBLE*

Parmi les scénarii préférés ayant obtenus une valeur de mérite supérieure à 7,5/10, les scénarii qui consomment le moins sont (voir Figure 8) :

- Le lampadaire sur pied à 1m80 du sol fournissant 150 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile fourni par l'éclairage plafonnier (Consommation 86.01 W, Valeur de mérite 10/10) ;
- Le lampadaire sur pied à 1m20 du sol fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile fourni par l'éclairage plafonnier (Consommation 78.74 W, Valeur de mérite 8,96/10) ;
- La lampe de bureau fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile fourni par l'éclairage plafonnier (Consommation 78.74 W, Valeur de mérite 7,84/10).



**Figure 7 : Consommation et préférences des différents scénarii du bureau double**



**Figure 8 : Scénarii du Bureau Double préférés par les observateurs consommant le moins**

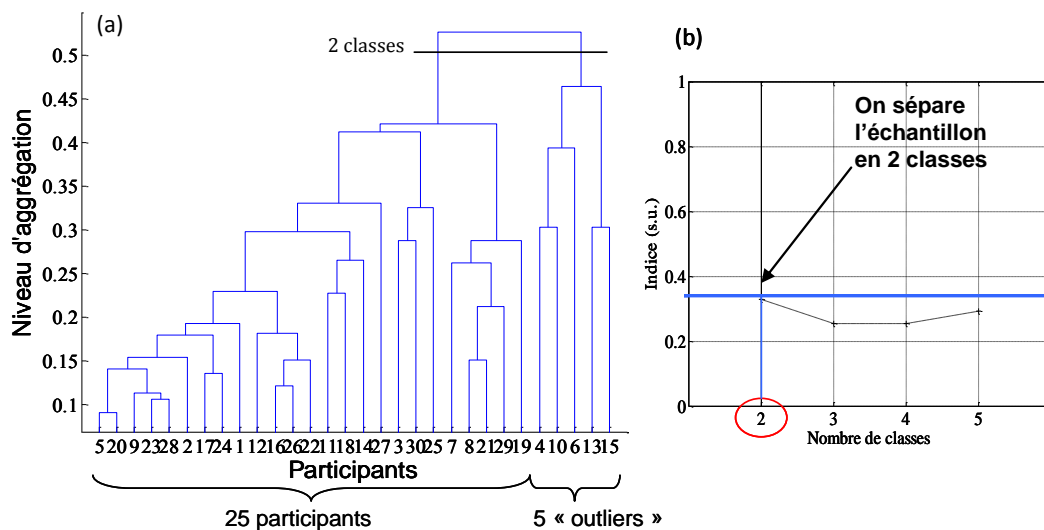


## IV-2. DESCRIPTION DETAILLÉE DE L'ANALYSE STATISTIQUE

### a. BUREAU SIMPLE

#### Vérification de la qualité de l'échantillon (sélection de 25 observateurs sur 30)

30 personnes ont participé au test. Une classification ascendante hiérarchique (CAH) est effectuée pour étudier l'éventuelle existence de sous-populations présentant des avis divergents sur l'ensemble des scénarii. S'il existe plusieurs sous-populations, les données des échantillons de chaque sous-population doivent être analysées séparément. En calculant les distances entre les données de chaque participant, la CAH permet de regrouper de façon hiérarchique les individus en fonction de la ressemblance de leur jugement. Dans une étude ayant pour but la recherche d'un consensus, une sous-population constituée de moins de 20% de la taille de l'échantillon est un ensemble de personnes « outliers » dont les jugements sont distants du reste des données et doivent donc être retirés de l'analyse statistique. Une personne peut être « outlier » car elle n'a pas compris la consigne, n'est pas cohérente dans ses jugements ou a des préférences divergentes de la majorité. Les résultats de la CAH sont représentés sous forme d'un diagramme présentant l'arrangement des groupes générés nommé dendrogramme.

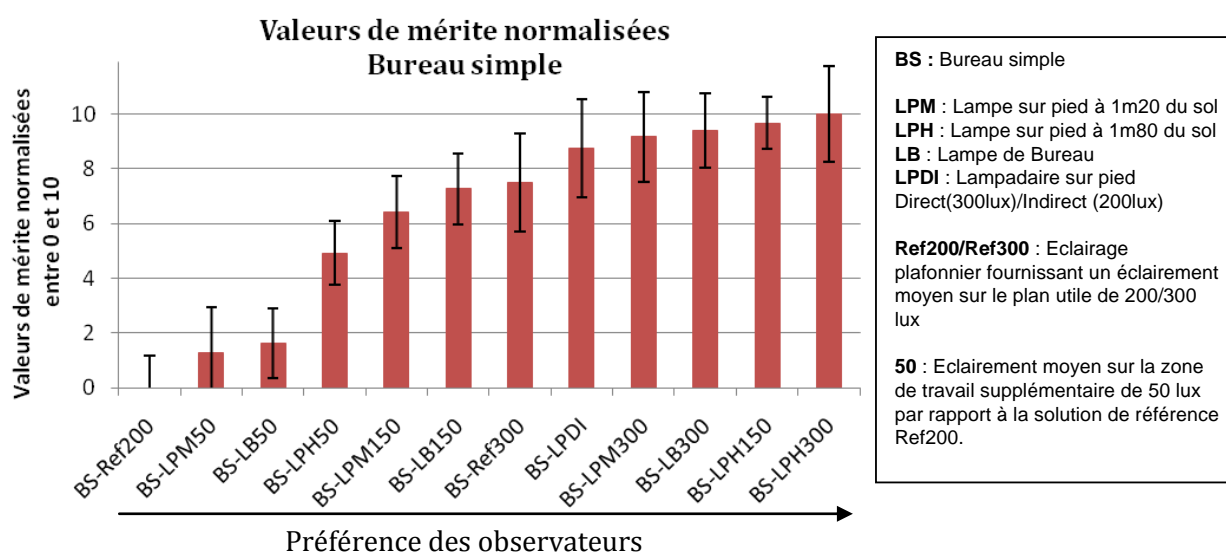


**Figure 9 : Résultats de la CAH. (a) Dendrogramme (b) Indice de qualité – Bureau simple**

La Figure 9 présente les résultats de la CAH effectuée avec la distance nominale et le lien d'agrégation moyen [Gordon, 1999]. Le graphe (b) présente la valeur de l'indice de qualité qui permet de définir où effectuer la séparation des groupes d'individus sur le dendrogramme. Plus l'indice est proche de 1 et plus le nombre de classes correspondant est pertinent. D'après le graphe (b) Figure 9, 2 classes sont retenues. Les jugements de préférences des participants 4, 6, 10, 13 et 15 diffèrent de la majorité. Pour déterminer si ces participants peuvent être considérés comme « outliers » et supprimer leurs données de l'analyse statistique, les analyses des sections suivantes ont été effectuées avec et sans leur données. La suppression des données des 5 « outliers » permet de réduire les intervalles de confiance sans modifier les préférences moyennes. Aussi, dans cette étude ayant pour but d'identifier quelles sont les préférences pour la majorité des personnes (et non une compréhension des préférences individuelles), les analyses statistiques ont été effectuées avec les données des 25 participants restants.

Calcul des valeurs de mérite

Pour évaluer la préférence moyenne du groupe d'observateurs pour chaque scénario et pour classer les scénarii par ordre de préférence, une analyse unidimensionnelle est effectuée avec les données des 25 participants. En utilisant la loi du jugement comparatif de Thurstone, cas V [Thurstone, 1927], une valeur de mérite est calculée pour chaque scénario. Ces valeurs de mérite retranscrivent de manière quantitative la préférence moyenne de chaque scénario. Ces valeurs ont été normalisées sur une échelle croissante entre 0 et 10. **Les valeurs de mérite les plus élevées correspondent aux scénarii préférés.** Elles sont connues sur un intervalle de confiance à 95% calculé par la méthode du bootstrap. Les résultats du calcul pour le bureau simple sont retranscrits Tableau 5 et représentés Figure 10.



**Figure 10 :** Représentation graphique des valeurs de mérite normalisées et des intervalles de confiance – Bureau simple

STIMULI	Valeurs de mérite normalisées entre 0 et 10	Intervalles de confiance à 95%
BS_Ref200	0,00	1,18
BS_LPM50	1,29	1,66
BS_LB50	1,63	1,27
BS_LPH50	4,92	1,16
BS_LPM150	6,43	1,32
BS_LB150	7,27	1,30
BS_Ref300	7,51	1,79
BS_LPDI	8,75	1,81
BS_LPM300	9,16	1,65
BS_LB300	9,41	1,36
BS_LPH150	9,68	0,94
BS_LPH300	10,00	1,74

**BS :** Bureau simple

**LPM :** Lampe sur pied à 1m20 du sol  
**LPH :** Lampe sur pied à 1m80 du sol  
**LB :** Lampe de Bureau  
**LPDI :** Lampadaire sur pied Direct(300lux)/Indirect (200lux)

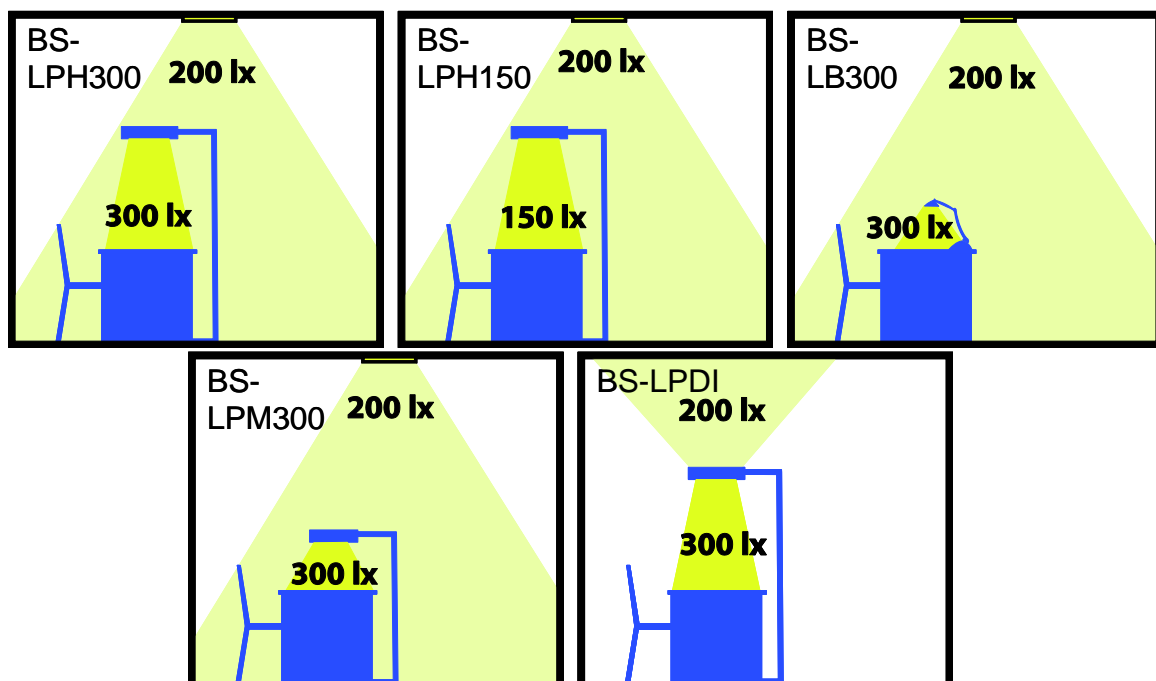
**Ref200/Ref300 :** Eclairage plafonnier fournissant un éclairage moyen sur le plan utile de 200/300 lux

**50 :** Eclairage moyen sur la zone de travail supplémentaire de 50 lux par rapport à la solution de référence Ref200.

**Tableau 5 :** Valeurs de mérite normalisées et intervalle de confiance – Bureau simple

Les scénarii présentant les valeurs de mérite les plus élevées ont été jugés les plus adaptés pour travailler. Les scénarii ayant obtenu une valeur de mérite supérieure à 8/10 sont (voir Figure 11):

- BS-LPH300 : le lampadaire sur pied à 1m80 du sol fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier ;
- BS-LPH150 : le lampadaire sur pied à 1m80 du sol fournissant 150 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier ;
- BS-LB300 : la lampe de bureau à 1m20 du sol fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier ;
- BS-LPM300 : le lampadaire sur pied à 1m20 du sol fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier ;
- BS-LPDI : le lampadaire sur pied Direct/Indirect à 1m80 du sol fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail avec sa composante directe et 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile avec sa composante indirecte.



**Figure 11** : Scénarii du Bureau simple les PLUS adaptés (préférence > 8/10)

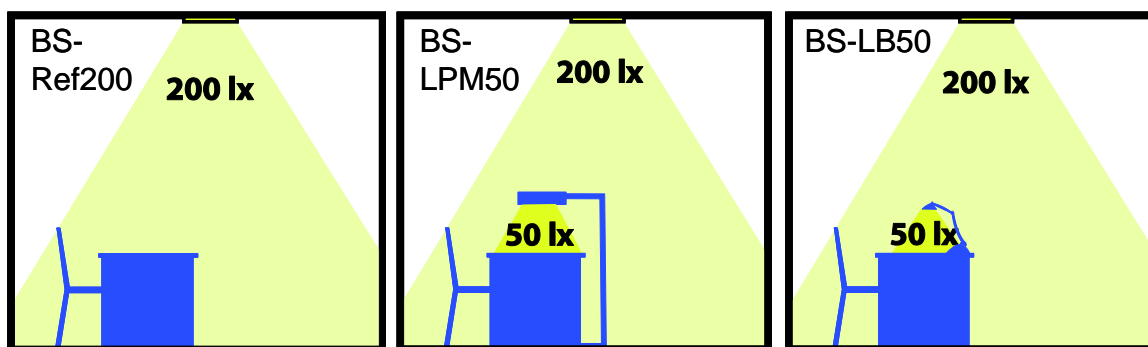
Si les intervalles de confiance de deux stimuli sont ne pas disjoints, il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les stimuli et il n'est pas possible de les hiérarchiser. D'après le calcul des intervalles de confiance (barres d'erreurs sur la Figure 10), les solutions ne présentant pas de différence significative ont été regroupées dans un même groupe [Howell, 1998]. Les résultats sont présentés Tableau 6. Le groupe A regroupe les 7 scénarii les plus adaptés, mais aucun ne peut donc être considéré meilleur que les autres. Ils présentent tous un éclairage moyen sur le plan de travail supérieur à 300 lux. Parmi les scénarii jugés les plus adaptés, LPH150, LB300 et LPM300 consomment le moins (<56W).

<b>BS-LPH300</b>	<b>A</b>		
<b>BS-LPH150</b>	<b>A</b>		
<b>BS-LB300</b>	<b>A</b>		
<b>BS-LPM300</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	
<b>BS-LPDI</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	
<b>BS-Ref300</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	
<b>BS-LB150</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	
<b>BS-LPM150</b>		<b>B</b>	
<b>BS-LPH50</b>		<b>B</b>	
<b>BS-LB50</b>			<b>C</b>
<b>BS-LPM50</b>			<b>C</b>
<b>BS-Ref200</b>			<b>C</b>

**Tableau 6 :** Groupes de solutions non significativement différentes – Bureau simple

Par ailleurs, les solutions jugées les moins adaptées pour travailler présentent un éclairage moyen sur le plan de travail inférieur à 250 lux (voir Figure 12). Il s'agit de :

- BS-Ref200 : la solution de référence avec un éclairage plafonnier uniquement, fournissant un éclairage moyen de 200 lux sur le plan utile ;
- BS-LPM50 : le lampadaire sur pied à 1m20 du sol et un éclairage moyen sur la zone de travail de 50 lux en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier ;
- BS- LB50 : la lampe de bureau à 1m20 du sol et un éclairage moyen sur la zone de travail de 50 lux en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier .



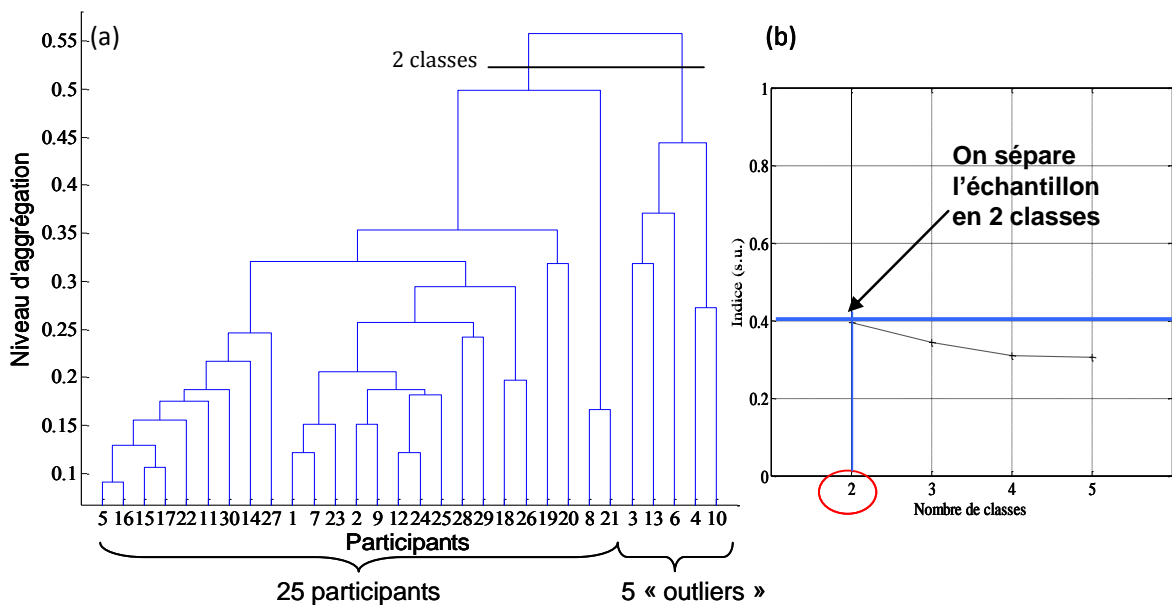
**Figure 12:** Scenarii du Bureau Simple jugés les moins adaptés

*b. BUREAU DOUBLE*

La même analyse statistique (présentée en détail section IV-2 a) a été effectuée avec les données du bureau double.

Vérification de la qualité de l'échantillon (sélection de 25 observateurs sur 30)

La Figure 13 présente les résultats de la CAH effectuée avec la distance nominale et le lien moyen à partir des données de dominance [Gordon, 1999]. Les jugements de préférences des participants 3, 4, 6, 10 et 13 diffèrent de la majorité. La suppression des données des 5 « outliers » dans l'analyse statistique permet de réduire les intervalles de confiance sans modifier les préférences moyennes. Aussi, les analyses statistiques ont été effectuées avec les données de 25 participants.



**Figure 13** : Résultats de la CAH. (a) Dendrogramme (b) Indice de qualité – Bureau double

Calcul des valeurs de mérite

Comme pour le bureau simple (voir section IV-2 a) les valeurs de mérite des scenarii du bureau double ont été calculées avec la loi du jugement comparatif [Thurstone, 1927] puis normalisées sur une échelle croissante entre 0 et 10. **Les valeurs de mérite les plus élevées correspondent aux scenarii préférés.** Elles sont connues sur un intervalle de confiance à 95% calculé par la méthode du bootstrap. Les résultats des calculs pour le bureau double sont retranscrits Tableau 7 et représentés Figure 14.

STIMULI	Valeurs de mérite normalisées entre 0 et 10	Intervalles de confiance à 95%
BD_Ref200	0,00	1,12
BD_LB50	2,04	1,03
BD_LPM50	2,31	1,17
BD_LB150	4,91	1,13
BD_LPH50	5,47	1,31
BD_Ref300	5,74	0,90
BD_LPM150	6,46	1,37
BD_LB300	7,84	1,36
BD_LPM300	8,96	1,37
BD_DI500	9,08	1,20
BD_LPH300	9,31	1,60
BD_LPH150	10,00	1,54

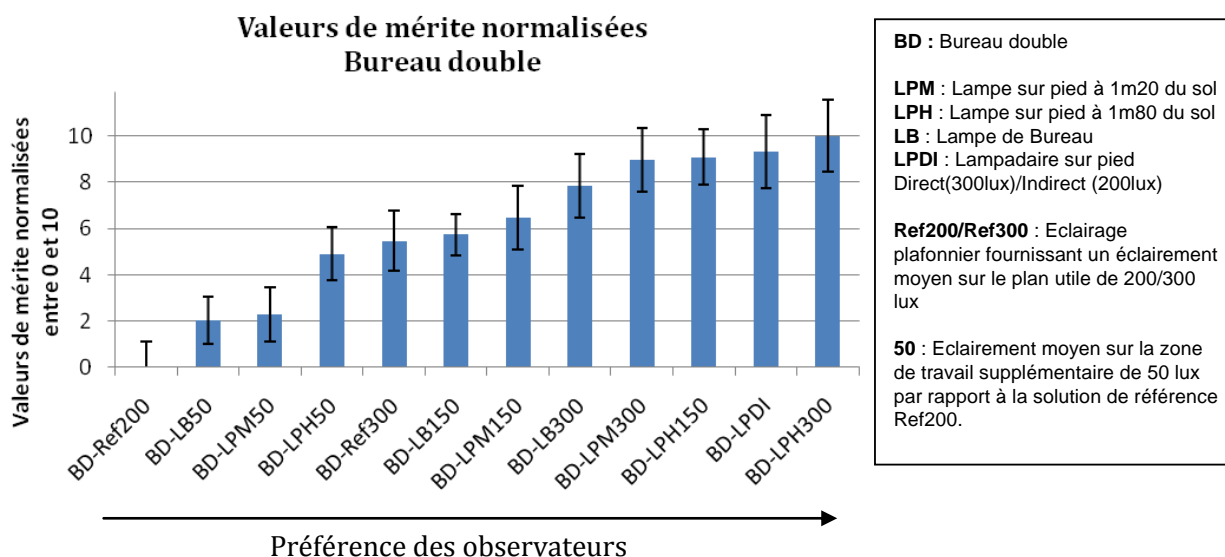
**BD** : Bureau double

**LPM** : Lampe sur pied à 1m20 du sol  
**LPH** : Lampe sur pied à 1m80 du sol  
**LB** : Lampe de Bureau  
**LPDI** : Lampadaire sur pied Direct(300lux)/Indirect (200lux)

**Ref200/Ref300** : Eclairage plafonnier fournissant un éclairage moyen sur le plan utile de 200/300 lux

**50** : Eclairage moyen sur la zone de travail supplémentaire de 50 lux par rapport à la solution de référence Ref200.

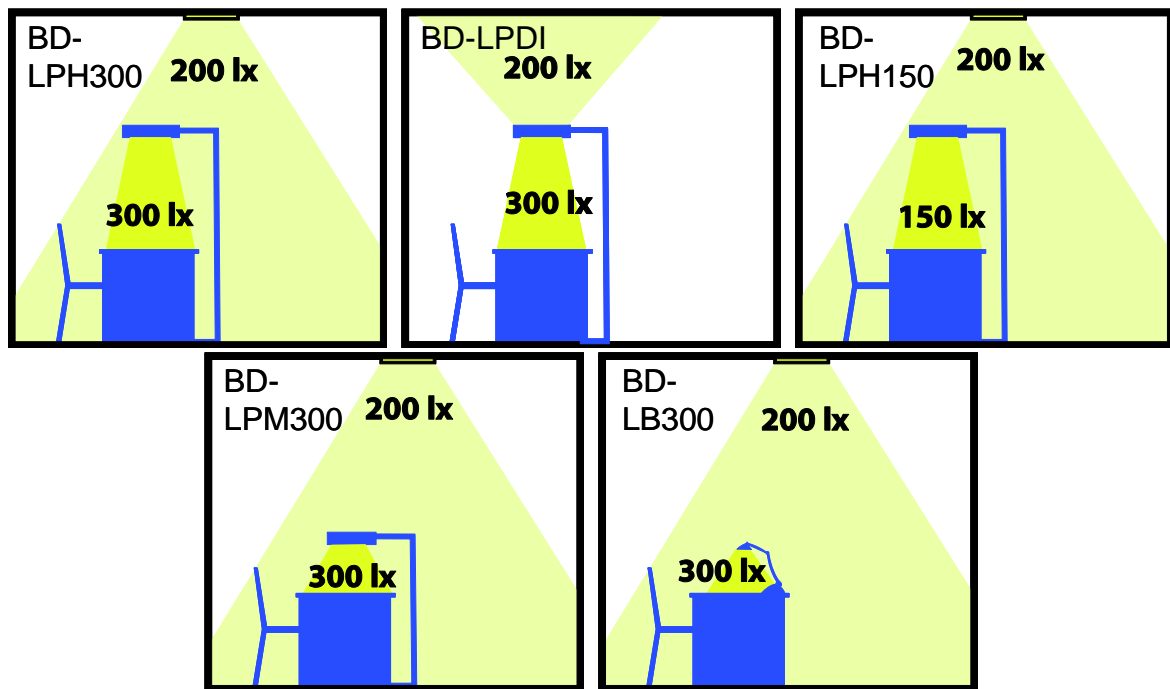
**Tableau 7** : Valeurs de mérite normalisées et intervalle de confiance – Bureau double



**Figure 14** : Représentation graphique des valeurs de mérite normalisées et des intervalles de confiance – Bureau Double

Les scenarii présentant les valeurs de mérite les plus élevées ont été jugés les plus adaptés pour travailler. Ils sont représentés Figure 15 et sont :

- BD-LPH300 : le lampadaire sur pied à 1m80 du sol fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier ;
- BS-LPDI : le lampadaire sur pied Direct/Indirect à 1m80 du sol fournissant 300 lux sur la zone de travail avec sa composante directe et 200 lux d'éclairage moyen sur le plan utile avec sa composante indirecte ;
- BS-LPH150 : le lampadaire sur pied à 1m80 du sol fournissant 150 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier ;
- BS-LPM300 : le lampadaire sur pied à 1m20 du sol fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier ;
- BS-LB300 : la lampe de bureau à 1m20 du sol fournissant 300 lux d'éclairage moyen sur la zone de travail en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier .



**Figure 15** : Scenarii du Bureau Double les plus adaptés (préférence > 7.5/10)

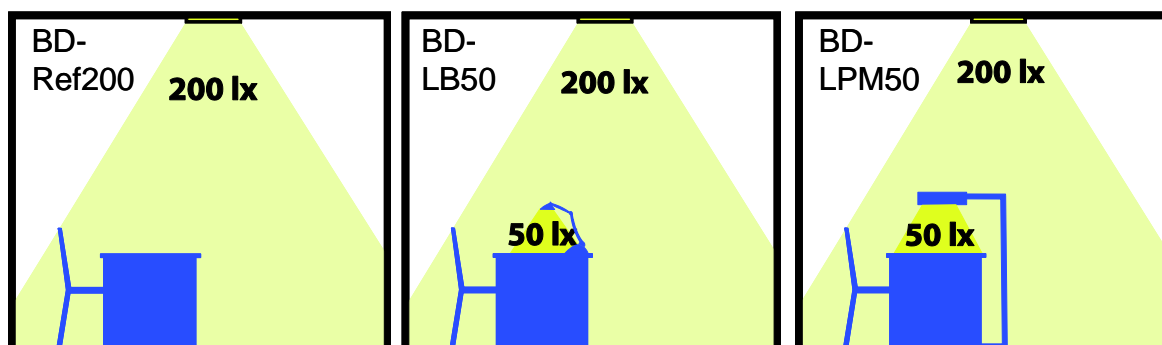
D'après le calcul des intervalles de confiance (barres d'erreurs sur la Figure 14), les solutions ne présentant pas de différence significative ont été regroupées dans un même groupe [Howell, 1998]. Les résultats sont présentés Tableau 8. Le groupe A regroupe les 5 scenarii les plus adaptés, mais aucun ne peut être considéré meilleur que les autres. Ils présentent tous un éclairage moyen sur le plan de travail supérieur à 300 lux. Parmi les scenarii jugés les plus adaptés, LPH150, LPM300 et LB300 consomment le moins (<90W).

<b>BD-LPH300</b>	<b>A</b>		
<b>BD-LPDI</b>	<b>A</b>		
<b>BD-LPH150</b>	<b>A</b>		
<b>BD-LPM300</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	
<b>BD-LB300</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	
<b>BD-LPM150</b>		<b>B</b>	
<b>BD-LB150</b>		<b>B</b>	
<b>BD-Ref300</b>		<b>B</b>	
<b>BD-LPH50</b>		<b>B</b>	
<b>BD-LPM50</b>			<b>C</b>
<b>BD-LB50</b>			<b>C</b>
<b>BD-Ref200</b>			<b>C</b>

**Tableau 8 :** Groupes de solutions non significativement différentes – Bureau double

Par ailleurs, les solutions jugées les moins adaptées pour travailler présentent un éclairage moyen sur le plan de travail inférieur à 250 lux (voir Figure 16). Il s'agit de :

- BD-Ref200 : la solution de référence avec un éclairage plafonnier uniquement fournissant un éclairage moyen de 200 lux sur le plan utile ;
- BD-LB50 : la lampe de bureau à 1m20 du sol et un éclairage moyen sur la zone de travail de 50 lux en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier ;
- BD-LPM50 : le lampadaire sur pied à 1m20 du sol et un éclairage moyen sur la zone de travail de 50 lux en plus des 200 lux fourni par l'éclairage plafonnier .



**Figure 16 :** Scenarii du Bureau Double jugés les moins adaptés



### IV-3. RECHERCHE DES RAISONS POUR LESQUELLES LES OBSERVATEURS ONT EXPRIME LEURS PREFERENCES

Après avoir déterminé les scénarii les plus adaptés pour travailler, nous essayons de connaître les facteurs pris en compte par les participants dans leur choix et ainsi déterminer les caractéristiques d'un éclairage de bureau de qualité.

Pour cela, une analyse multidimensionnelle sur les jugements de préférence avec MDPREF (Multidimensional Analysis of Preference) [Carroll et al., 1968] puis des tests de corrélations [Howell, 1998] ont été effectués. L'analyse multidimensionnelle permet de situer dans un espace de préférence à plusieurs dimensions les individus en fonction de leur préférence ainsi que les différents scénarii. Après avoir défini la taille de l'espace, des études de corrélations sont employées pour comprendre la signification de chaque dimension de l'espace de préférence. Cette analyse permet de relier les jugements de préférence à des paramètres physiques connus qui pourraient les expliquer (éclairage, uniformité, ...).

Les grandeurs physiques de chaque scène (éclairage moyen, minimum, maximum, uniformité) ont été calculées conformément à la norme EN12464-1 à partir d'un maillage de 6cm sur les trois zones de l'espace lumineux : la zone de travail de 0,36m<sup>2</sup> située à 0,70 m du sol (hauteur du bureau), la zone environnante immédiate autour de cette tâche (« surrounding task ») située à 0.70 m du sol (hauteur du bureau) et la zone de fond (« background task ») située sur le plan utile à 0,80 m du sol. Les données sont retranscrites en Annexe 2 (resp. Annexe 3) pour le bureau simple (resp. bureau double).

Les résultats de l'analyse sont d'abord présentés pour le bureau simple, puis dans la section IV-3-b pour le bureau double.

## a. BUREAU SIMPLE

Après une analyse préalable, un espace à 4 dimensions a été retenu pour le bureau simple. Les coordonnées de chaque stimulus dans l'espace sont retranscrits Tableau 9. Chaque dimension permet d'expliquer une partie des jugements de préférence émis par les participants.

		Dim 1	Dim 2	Dim 3	Dim 4
<b>Poids de la dimension (en %)</b>		57,4 %	18,8 %	10,4 %	4,2 %
<b>Coordonnées des Scenarii</b>	BS_LPM300	-0,1801	-0,4323	0,0653	-0,452
	BS_Ref300	-0,1445	0,4166	-0,6899	-0,2579
	BS_LB150	-0,0024	-0,2798	-0,1855	0,4962
	BS_LPH300	-0,4082	0,1719	0,1801	-0,3238
	BS_LPM150	0,099	-0,3098	-0,1258	-0,17
	BS_Ref200	0,445	0,3653	0,2218	-0,0319
	BS_LB50	0,369	0,0625	-0,0015	0,2169
	BS_LPH50	0,143	0,2192	-0,0193	0,1225
	BS_LPH150	-0,2268	0,1081	-0,1373	0,2713
	BS_LB300	-0,2265	-0,346	-0,0266	0,3145
	BS_LPM50	0,4562	-0,2314	0,1253	-0,3123
	BS_LPDI	-0,3237	0,2557	0,5935	0,1265

**Tableau 9** : Coordonnées des scenarii dans l'espace de préférence – Bureau simple

La Figure 17 représente la projection des résultats de l'analyse multidimensionnelle dans les deux premières dimensions ayant le plus de poids dans les jugements des participants. L'axe des abscisses (resp. ordonnées) correspond à la dimension 1 (resp. dimension 2). La préférence de chaque participant est représentée par un rond rouge relié au centre par un trait bleu. Le trait vert représente la moyenne des préférences du panel d'observateurs. Les stimuli sont représentés par des carrés.

Sur la Figure 17, la position des scenarii par rapport à l'orientation des préférences des participants dans l'espace confirme les valeurs de mérite obtenues dans la section III. Par exemple, BS-LPH300, un des scenarii les plus adaptés, est situé dans la direction des traits bleus i.e. des préférences de chaque participant tandis que BS-Ref200, un des scenarii les moins adaptés, se situe à l'opposé.

Une étude de corrélation a été menée pour comprendre la signification de chaque dimension de l'espace de préférence. Pour cela un test de corrélation de Pearson [Howell, 1998] est effectué entre les coordonnées de chaque dimension des différents scénarii et leurs grandeurs physiques. Plus le coefficient de Pearson est proche de 1, plus les deux entités sont corrélées. Les résultats sont les suivants.

- *Dimension 1*

La dimension 1 explique à 57,4% les jugements de préférence. Les coordonnées des stimuli sur la dimension 1 sont corrélées négativement à :

- **l'éclairage moyen global de la scène (Pearson -0,94, p-value<0,0001, R<sup>2</sup> 0,88) ;**
- l'éclairage moyen de la zone de travail (Pearson -0,89, p-value 0,0001, R<sup>2</sup> 0,79) ;
- l'éclairage moyen de la zone environnante immédiate (Pearson -0,84, p-value 0,001, R<sup>2</sup> 0,71).

- *Dimension 2*

La dimension 2 explique à 18,8% les jugements de préférence. Les coordonnées des stimuli sur la dimension 2 sont corrélées à **l'uniformité sur la zone de travail (Pearson 0,92, p-value<0,0001, R<sup>2</sup> 0,84).**

- *Dimension 3*

La dimension 3 explique à 10,4% les jugements de préférence. Les coordonnées des stimuli sur la dimension 3 sont corrélées négativement à :

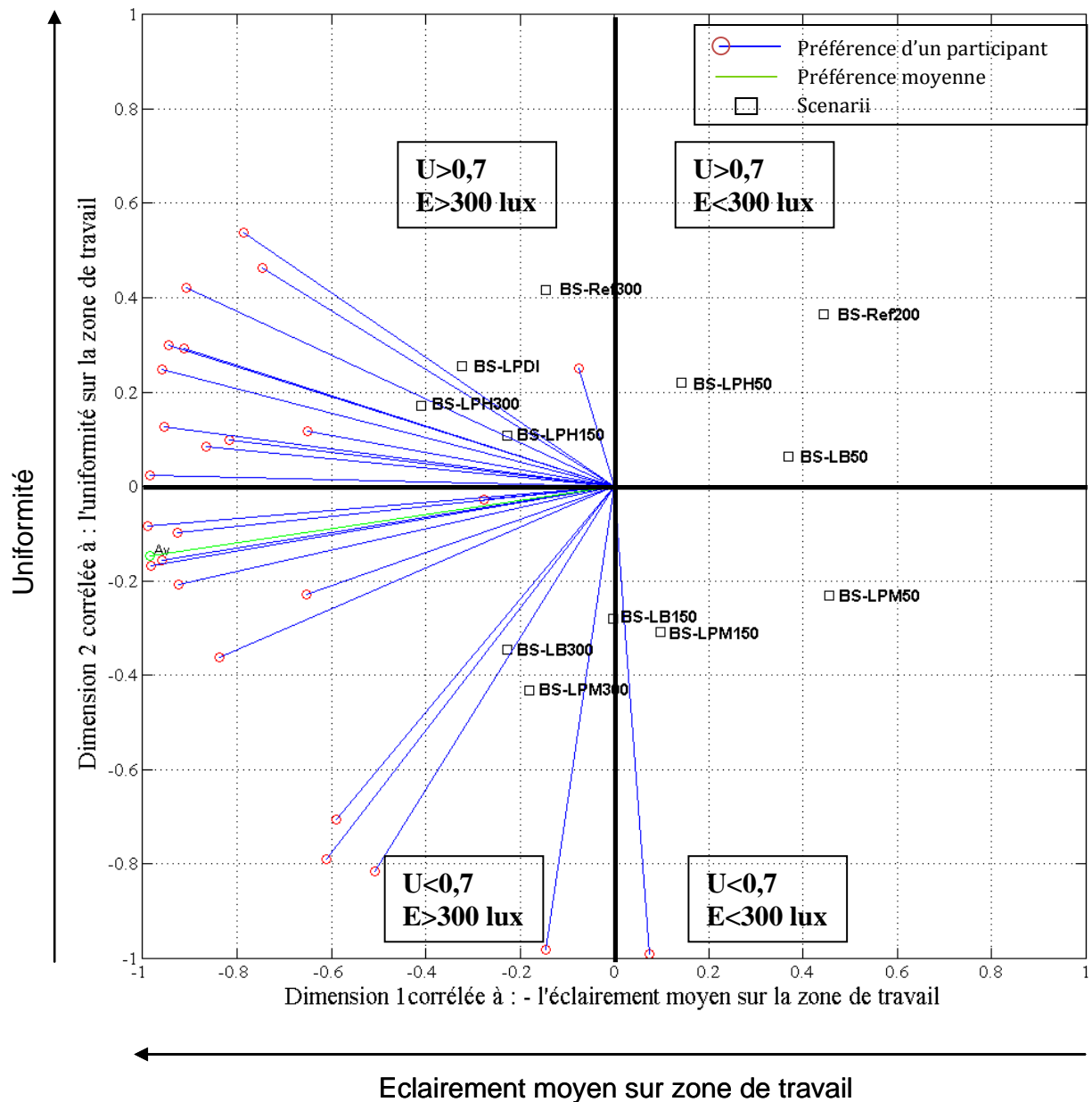
- **l'éclairage minimum de la zone de fond (Pearson -0,91, p-value<0,0001, R<sup>2</sup> 0,83) ;**
- l'éclairage vertical maximum du mur de gauche (Pearson -0,90, p-value<0,0001, R<sup>2</sup> 0,82) ;
- l'éclairage moyen de la zone de fond (Pearson -0,86, p-value 0,0003, R<sup>2</sup> 0,74) .

- *Dimension 4*

La dimension 4 explique à 4,2% les jugements de préférence. Pour la dimension 4, aucune grandeur physique ne présente de corrélation avec les coordonnées des stimuli sur cette dimension. Toutefois, nous avons observé graphiquement une corrélation que nous avons pu mettre en évidence par le test statistique en attribuant une valeur en fonction du scénario :

- 1 pour le lampadaire sur pied à 1m20 ;
- 2 pour lampe de bureau ;
- 3 pour les autres scénarii (sans lampe d'appoint, lampadaire sur pied à 1m80, lampadaire direct/indirect).

Les résultats de la corrélation avec ces données sont : **Pearson 0,8, p-value 0,002, R<sup>2</sup> 0,64.** Cela signifie que les coordonnées des stimuli sur **la dimension 4 sont corrélées au type de lampe d'appoint utilisé (aucune, bureau, sur pied) et apparaissant ou non dans le champ de vision de l'observateur.**



**Figure 17 :** Espace des dimensions 1 et 2 de l'analyse multidimensionnelle – Bureau simple

En regardant la Figure 17, on peut remarquer que :

- **les préférences des participants s'orientent à l'unanimité vers les valeurs négatives de la dimension 1, c'est-à-dire vers un éclairage moyen sur la zone de travail élevé.**
- Au contraire, les **préférences des participants sont divisées sur la dimension 2 corrélée avec l'uniformité**, mais reste pour la plupart autour de l'axe central. Les participants dont la préférence est située dans le carré en haut à gauche de la Figure 17 portent autant d'importance à l'éclairage moyen qu'à l'uniformité sur la zone de travail tandis que les participants dont la préférence est située dans le carré en bas à gauche de la Figure 17 ont privilégié l'éclairage moyen sur la zone de travail dans leur jugement de préférence.

Pour les dimensions 3 et 4 qui interviennent en second plan dans le jugement de préférence, aucune tendance n'apparaît clairement dans l'espace 3-4.

D'après les analyses statistiques, les participants ont pris en compte dans leur jugement des scenarii du **bureau simple** dans l'ordre décroissant :

- l'éclairage moyen sur la zone de travail et la luminosité globale de la scène ;
- l'uniformité sur la zone de travail ;
- la luminosité de la zone de fond (éclairage horizontal et vertical) ;
- la présence d'une lampe d'appoint dans le champ de vision et son esthétique

### b. BUREAU DOUBLE

Après une analyse préalable, un espace à 3 dimensions a été retenu pour le bureau double. Les coordonnées de chaque stimulus sont retranscrits Tableau 10. Chaque dimension permet d'expliquer une partie des jugements de préférence émis par les participants.

		Dim 1	Dim 2	Dim 3
<b>Poids de la dimension (en %)</b>		60,5 %	23,1 %	6,6 %
<b>Coordonnées des Scenarii</b>	BD_LPM50	0,3704	-0,0887	-0,306
	BD_LB50	0,3668	-0,0615	0,1448
	BD_Ref200	0,4792	0,2661	0,2589
	BD_LPH150	-0,3028	0,2014	-0,0477
	BD_LPM300	-0,194	-0,3516	-0,4055
	BD_LPDI	-0,4003	0,2379	0,1012
	BD_LPH50	0,0793	0,3352	-0,134
	BD_LB300	-0,1126	-0,4265	0,5517
	BD_LPH300	-0,4267	0,0787	0,1059
	BD_LPM150	0,0423	-0,3733	-0,4421
	BD_Ref300	0,0228	0,4379	-0,1343
	BD_LB150	0,0756	-0,2554	0,3072

**Tableau 10** : Coordonnées des scenarii dans l'espace de préférence – Bureau double

La Figure 18 représente la projection des résultats de l'analyse multidimensionnelle dans les deux premières dimensions ayant le plus de poids dans les jugements des observateurs. L'axe des abscisses (resp. ordonnées) correspond à la dimension 1 (resp. dimension 2). La préférence de chaque participant est représentée par un rond rouge relié au centre par un trait bleu. Le trait vert représente la moyenne des préférences du panel d'observateurs. Les stimuli sont représentés par des carrés.

Sur la Figure 18, la position des scenarii par rapport à l'orientation des préférences des participants dans l'espace confirme les valeurs de mérite obtenues dans la section III. Par exemple, BD-LPH300, un des scenarii les plus adaptés, est situé dans la direction des traits bleus i.e. des préférences de chaque participant tandis que BD-Ref200, un des scenarii les moins adaptés, se situe à l'opposé.

Une étude de corrélation a été menée pour comprendre la signification de chaque dimension de l'espace de préférence. Pour cela un test de corrélation de Pearson [Howell, 1998] est effectué entre les coordonnées de chaque dimension des différents scénarii et leurs grandeurs physiques. Plus le coefficient de Pearson est proche de 1, plus les deux entités sont corrélées. Les résultats sont les suivants :

- *Dimension 1*

La dimension 1 explique à 60,5% les jugements de préférence. Les coordonnées des stimuli sur la dimension 1 sont corrélées négativement à :

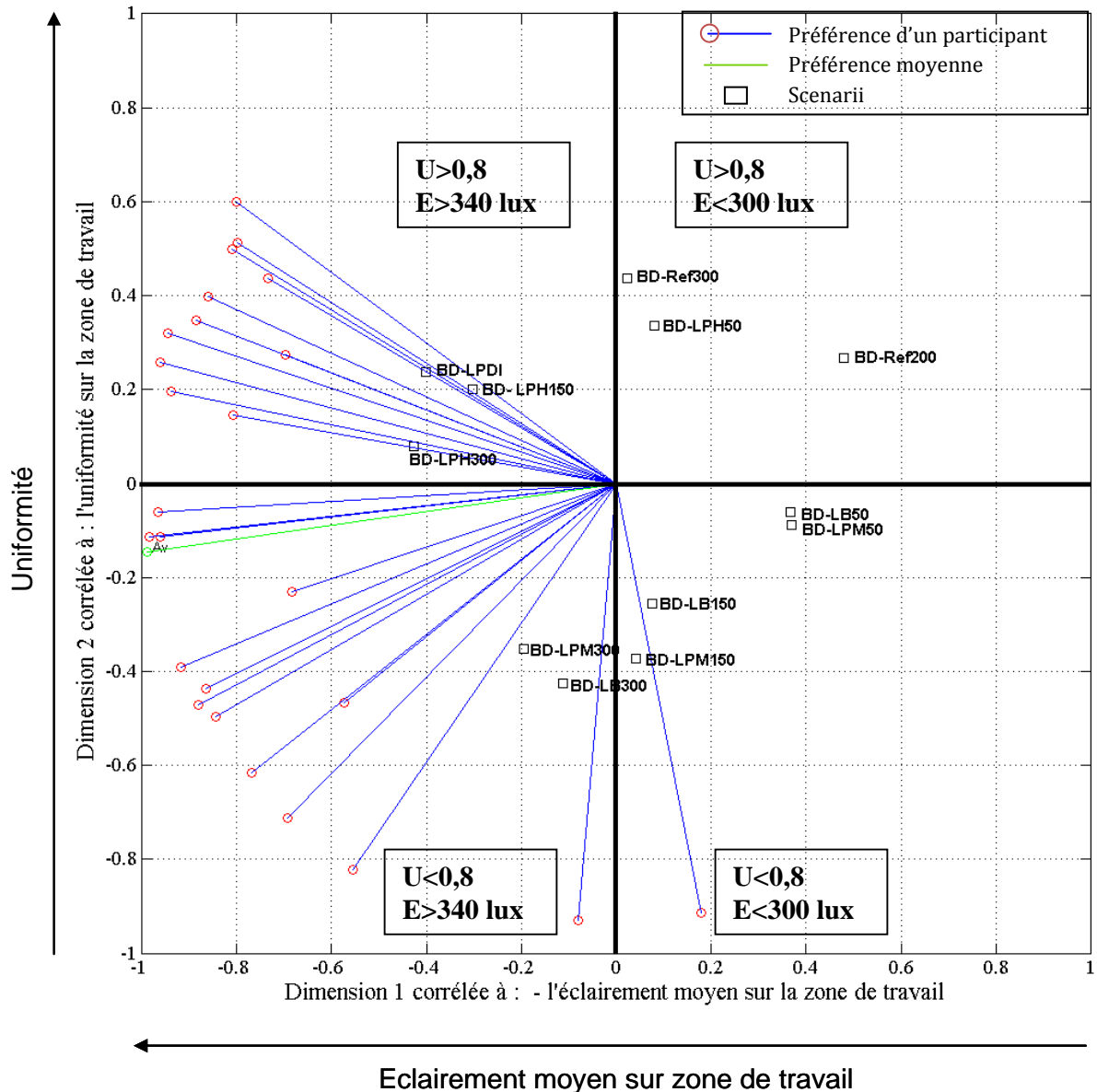
- **l'éclairage moyen de la zone de travail (Pearson -0,9, p-value <0,0001, R<sup>2</sup> 0,82) ;**
- l'éclairage moyen de la zone environnante immédiate (Pearson -0,9, p-value <0,0001, R<sup>2</sup> 0,82) ;
- l'éclairage moyen globale de la scène (Pearson -0,9, p-value <0,0001, R<sup>2</sup> 0,82) .

- *Dimension 2*

La dimension 2 explique à 23,1% les jugements de préférence. Les coordonnées des stimuli sur la dimension 2 sont corrélées à **l'uniformité sur la zone de travail (Pearson 0,95, p-value <0,0001, R<sup>2</sup> 0,91).**

- *Dimension 3*

La dimension 3 explique à 6,6% les jugements de préférence. Pour la dimension 3, aucune corrélation n'a pu être établie entre les coordonnées des stimuli sur cette dimension et un paramètre connu.



**Figure 18 :** Espace des dimensions 1 et 2 de l'analyse multidimensionnelle – Bureau double

En regardant la Figure 18, on peut remarquer que :

- **les préférences des participants s'orientent à l'unanimité vers les valeurs négatives de la dimension 1, c'est-à-dire vers un éclairage moyen sur la zone de travail élevé.**
- **Au contraire, les préférences des participants sont divisées sur la dimension 2, corrélée avec l'uniformité, en deux groupes :**
  - o les participants dont la préférence est située dans le carré en haut à gauche de la Figure 18 portent autant d'importance à l'éclairage moyen qu'à l'uniformité sur la zone de travail ;
  - o les participants dont la préférence est située dans le carré en bas à gauche de la Figure 18 ont privilégié l'éclairage moyen sur la zone de travail dans leur jugement de préférence.

#### Partie IV : Résultats de l'étude – Recherche des raisons des préférences des observateurs

Pour les dimensions 3 et 4 qui interviennent en second plan dans le jugement de préférence, aucune tendance n'apparaît clairement dans l'espace 3-4.

D'après les analyses statistiques, les participants ont pris en compte dans leur jugement des scénarii du **bureau double** dans l'ordre décroissant :

- l'éclairage sur le plan de travail et la luminosité globale de la scène ;
- l'uniformité sur la zone de travail



## BIBLIOGRAPHIE

REINHART C. AND BRETON P.F., *Experimental validation of 3ds max ® Design 2009 and Daysim 3.0*, Building Simulation, 2009.

LABAYRADE R. *Use of CIE 171:2006 test cases to assess the scope of lighting simulation programs*, Building simulation, 2009.

HOWELL D.C., *Méthodes statistiques en sciences humaines*, Edition de Boeck Université, Janvier 1998, 821 p.

THURSTONE L., *A law of comparative judgment*, Psychological Review, 1927, vol. 34, pp 273-286.

THURSTONE L., *The method of paired comparisons for social values*, The Journal of Abnormal and Social Psychology, 1927, 21, pp 384-400.

GORDON. A.D. *Classification*, 2<sup>nd</sup> Edition, Chapman and hall, 1999. 256 p.

CARROLL. J.D. AND CHANG,. J.J *How to use MDPREF, a Computer Program for Multidimensional Analysis of Preference Data*, Bell Laboratories. 1968

## ANNEXES

ANNEXE 1 : SCENARI ET SIMULATIONS CORRESPONDANTES

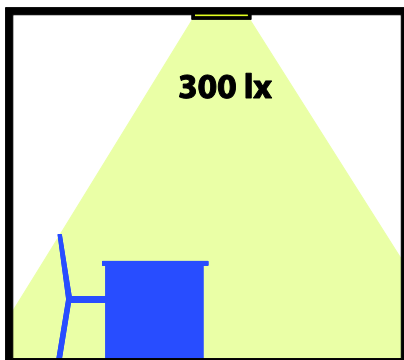
ANNEXE 2 : DONNEES SUR LES SCENARI – BUREAU SIMPLE (FLUX, ECLAIREMENT, UNIFORMITE, CONSOMMATION)

ANNEXE 3 : DONNEES SUR LES SCENARI – BUREAU DOUBLE (FLUX, ECLAIREMENT, UNIFORMITE, CONSOMMATION)

ANNEXE 1 : SCENARI ET SIMULATIONS CORRESPONDANTES

**Figure 19 : Simulations des bureaux**

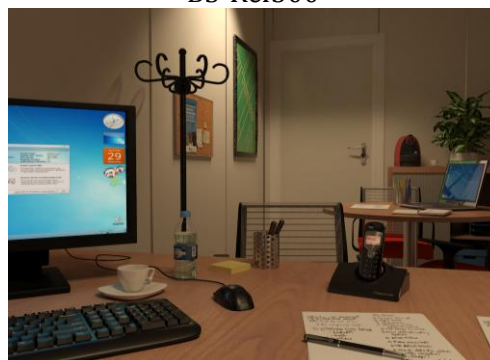
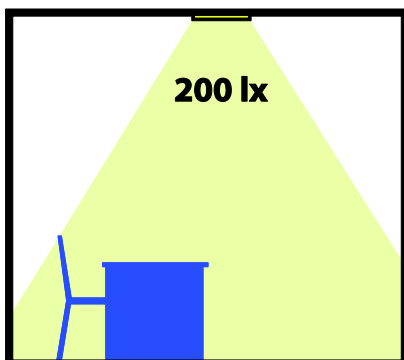
# Rapport d'éclairage



BS-Ref300



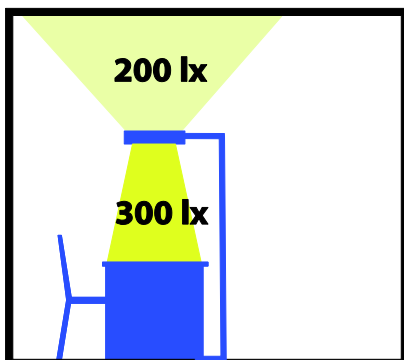
BD-Ref300



BS-Ref200



BD-Ref200

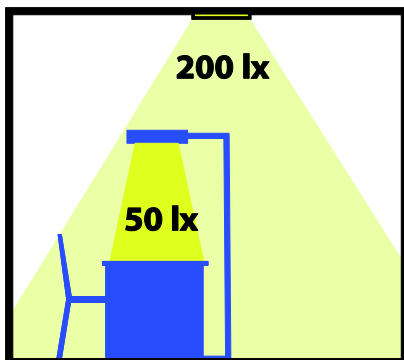


BS-LPDI



BD-LPDI

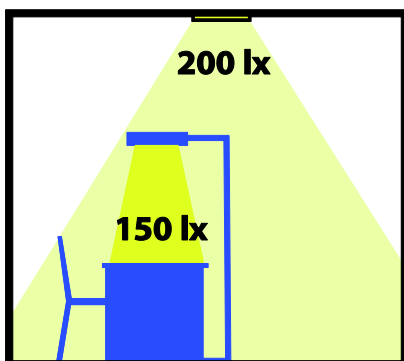
# Rapport d'éclairage



BS-LPH50



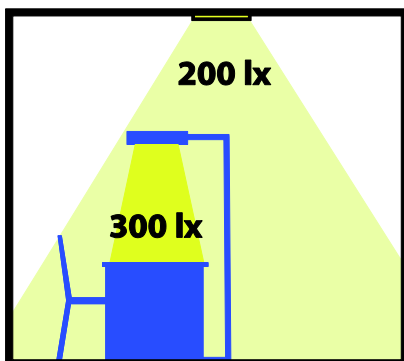
BD-LPH50



BS-LPH150



BD-LPH150

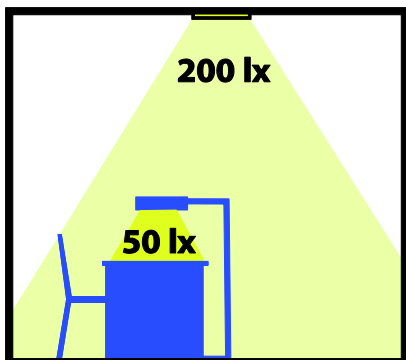


BS-LPH300



BD-LPH300

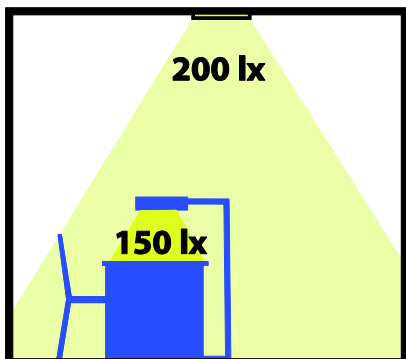
# Rapport d'éclairage



BS-LPM50



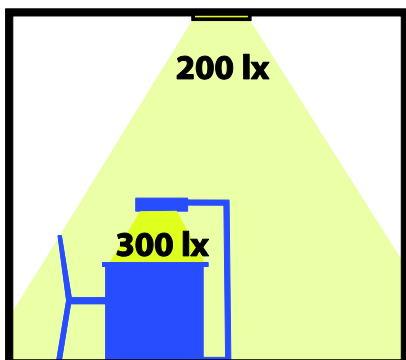
BD-LPM50



BS-LPM150



BD-LPM150

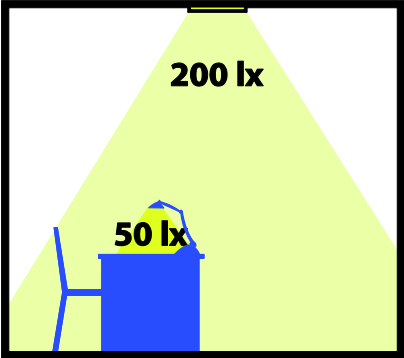


BS-LPM300



BD-LPM300

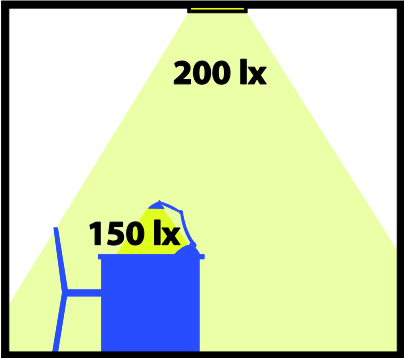
Rapport d'éclairage



BS-LB50



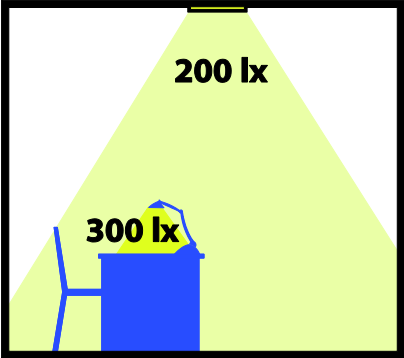
BD-LB50



BS-LB150



BD-LB150



BS-LB300



BD-LB300

ANNEXE 2 : DONNEES SUR LES SCENARII – BUREAU SIMPLE (FLUX, ECLAIREMENT, UNIFORMITE, CONSOMMATION)

			Zone de travail		Zone environnante immédiate		Zone de fond		Eclairage vertical mur de gauche	Global	Conso (en W)
	Flux Plafond (lm)	Flux Appoint (lm)	Emoy (lux) travail	Uniformité travail	Emoy (lux) env.	Uniformité env.	Emoy (lux) fond	Uniformité fond	E <sub>max</sub> vertical	Emoy 3 zones	
BS_LPM300	3800	144	408	0,45	211	0,24	205	0,31	951	275	51,62
BS_Ref300	5200	0	244	0,89	211	0,57	272	0,38	1886	242	65,00
BS_LB150	3800	72	287	0,54	171	0,30	205	0,31	952	221	50,31
BS_LPH300	3800	689	491	0,82	332	0,23	205	0,31	951	343	61,53
BS_LPM150	3800	72	287	0,54	171	0,30	205	0,31	952	221	50,31
BS_Ref200	3800	0	166	0,72	130	0,39	205	0,31	951	167	49,00
BS_LB50	3800	25	208	0,64	144	0,35	205	0,31	951	186	49,45
BS_LPH50	3800	110	218	0,77	162	0,34	205	0,31	951	195	51,00
BS_LPH150	3800	344	329	0,80	231	0,28	205	0,31	951	255	55,25
BS_LB300	3800	144	408	0,45	211	0,24	205	0,31	951	275	51,62
BS_LPM50	3800	25	208	0,64	144	0,35	205	0,31	951	186	49,45
BS_LPDI	3700	1100	467	0,85	365	0,51	83	0,43	342	305	60,00

**Tableau 11 : Données sur les scenarii – Bureau simple**



ANNEXE 3 : DONNEES SUR LES SCENARII – BUREAU DOUBLE (FLUX, ECLAIREMENT, UNIFORMITE, CONSOMMATION)

	Zone de travail		Zone environnante immédiate		Zone de fond		Eclairage vertical mur de gauche	Global	Conso (en W)		
	Flux Plafond (lm)	Flux Appoint (lm)	Emoy (lux) travail	Uniformité travail	Emoy (lux) env.	Uniformité env.	Emoy (lux) fond	Uniformité fond		Emax vertical	Emoy 3 zones
BD_LPM50	5700	25	222	0,70	159	0,428	271	0,40	865	217	74,41
BD_LB50	5700	25	222	0,70	159	0,428	271	0,40	865	217	74,41
BD_Ref200	5700	0	180	0,80	144	0,465	271	0,40	865	198	73,50
BD_LPH150	5700	344	345	0,83	250	0,364	271	0,40	865	289	86,01
BD_LPM300	5700	144	422	0,46	227	0,300	271	0,40	865	307	78,74
BD_LPDI	3700	1250	468	0,84	354	0,458	67	0,51	310	296	120,0
BD_LPH50	5700	110	233	0,82	178	0,421	271	0,40	865	227	77,50
BD_LB300	5700	144	422	0,46	227	0,300	271	0,40	865	307	78,74
BD_LPH300	5700	689	511	0,83	357	0,319	271	0,40	865	380	98,55
BD_LPM150	5700	72	301	0,56	186	0,366	271	0,40	865	253	76,12
BD_Ref300	7800	0	239	0,88	210	0,562	341	0,52	1467	263	97,50
BD_LB150	5700	72	301	0,56	186	0,366	271	0,40	865	253	76,12

**Tableau 12** : Données sur les scenarii – Bureau double



## ***6.9 Rapport CSTB – CERTIVEA – Les Immeubles verts tiennent-ils leurs promesses ?***

**LES IMMEUBLES DE BUREAUX « VERTS »  
TIENNENT-ILS LEURS PROMESSES ?**

**Performances réelles, valeur immobilière et  
certification « HQE® Exploitation »**

**Jean Carassus**

**Mars 2011**

Cette étude, commanditée par le CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT et CERTIVEA, a été réalisée par Jean CARASSUS, Professeur à l'École des Ponts ParisTech, Immobilier Durable Conseil, 56 rue de Malte, 75011 Paris. Tél 06 61 30 61 66. - APE 7022Z - SIRET 511 334 617 00012 - Courriel : [jean.carassus@immobilierdurable.eu](mailto:jean.carassus@immobilierdurable.eu) .  
Blog : [www.immobilierdurable.eu](http://www.immobilierdurable.eu)

## SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE</b> .....	3
<b>RESUME</b> .....	5
<b>INTRODUCTION</b> .....	7
<b>1/ QUELLES SONT LES PERFORMANCES REELLES DES IMMEUBLES DE BUREAUX CERTIFIES ?</b>	
Une analyse statistique d'immeubles certifiés LEED.....	8
Trois études de cas d'immeubles de bureaux certifiés HQE® .....	9
Les trois causes de décalage entre performances conventionnelles et performances réelles.....	11
<b>2/ VA-T-ON VERS LA MESURE DES PERFORMANCES REELLES ?</b> .....	13
Les ambiguïtés du Grenelle de l'Environnement.....	13
L'approche britannique.....	14
Les utilisateurs s'intéressent aux performances réelles.....	15
<b>3/ QUEL LIEN Y A-T-IL ENTRE PERFORMANCES ET VALEUR IMMOBILIERE?</b> .....	16
Certifications Energy Star et LEED et valeur immobilière.....	16
Les approches du Groupe Valeur Verte du Plan Bâtiment Grenelle et du Groupe « Valeur Verte en Pratique ».....	19
Investissement, performances théoriques, performances réelles.....	23
<b>4/ QUELLE EST L'AVANCEE DE LA CERTIFICATION « HQE® EXPLOITATION » ?</b> .....	25
Le contenu de la certification « HQE® Exploitation ».....	25
L'avis des entreprises interviewées.....	26
Les suggestions faites par les professionnels.....	28
<b>5/ QUELLES TRANSFORMATIONS DU SYSTEME D'ACTEURS DE LA CONSTRUCTION ET DE L'IMMOBILIER SONT NECESSAIRES POUR UN PILOTAGE PAR LES PERFORMANCES REELLES ?</b>	
Qualité d'usage, exploitation maintenance et conception.....	29
Vers la garantie de la qualité environnementale intrinsèque de l'immeuble.....	32
Evolution des métiers de propriétaire/gestionnaire, d'utilisateur et d'exploitant et de leurs rapports.....	32
<b>ONZE RECOMMANDATIONS</b> .....	35
<b>ANNEXE 1</b> .....	38
Les personnes interviewées	

<b>ANNEXE 2</b> .....	39
Les enseignements de la recherche d’Orlando CATARINA (CSTB) et Sebastien ILLOUZ (ICADE) « Retour d’expérience de bâtiments de bureaux certifiés HQE® : dynamiser l’efficacité énergétique des gestionnaires de patrimoine du secteur privé ». PREBAT-ADEME. 2009.	
<b>ANNEXE 3</b> .....	42
Liste et caractéristiques des opérations certifiées « HQE® Exploitation » au 23 février 2011.	
<b>ANNEXE 4</b> .....	48
Références	

## RESUME

*L'étude donne des éléments de réponse à cinq questions :*

### *1/ Quelles sont les performances réelles des immeubles de bureaux certifiés ?*

*Les immeubles de bureaux certifiés auraient<sup>1</sup> en moyenne des performances réelles supérieures aux immeubles non certifiés, mais dans un certain nombre de cas, les performances réelles peuvent sensiblement inférieures aux prévisions conventionnelles.*

*Les décalages entre performances conventionnelles et performances réelles peuvent avoir trois causes :*

- La première peut être une différence de l'utilisation par les occupants avec les prévisions conventionnelles, en particulier sur la température intérieure et la durée d'occupation,*
- La seconde peut être due à des difficultés de gestion et de pilotage de l'installation technique,*
- La troisième peut être relative à la programmation, la conception ou à la réalisation de l'immeuble, avec par exemple certains choix de programmation inadaptés à la gestion ou des équipements une fois installés moins performants que prévu.*

### *2/ Va-t-on vers la mesure des performances réelles ?*

*Le mouvement est vers la mesure des performances environnementales réelles des immeubles tant de la part:*

- des pouvoirs publics, malgré quelques ambiguïtés du Grenelle de l'Environnement,*
- et des professionnels de l'immobilier, en particulier les utilisateurs.*

### *3/ Quel lien y a-t-il entre valeur immobilière et performances ?*

*Sur le marché américain, seul marché où plusieurs centaines d'immeubles de bureaux certifiés (Energy Star® ou LEED®) ont été loués, occupés et revendus, un immeuble de bureaux « vert » a tendance à se louer plus cher, à avoir un taux d'occupation plus élevé et un prix de revente plus fort qu'un immeuble « non vert » de caractéristiques comparables.*

*Le lien entre performances environnementales et valeur immobilière est probable, à condition que l'immeuble « vert » respecte les fondamentaux de l'immobilier : qualité de la localisation et de la desserte en transports en commun, qualité d'usage adaptée à la demande.*

*Cette « valeur verte » pourra prendre deux formes :*

---

<sup>1</sup> Nous employons le conditionnel vu le faible nombre d'immeubles certifiés de bureaux HQE® et BBC Effinergie® aujourd'hui en exploitation et vu l'absence d'observatoire des performances réelles des immeubles de bureaux certifiés et non certifiés comparables.



- Une survaleur pour les immeubles « verts », dans le cadre de marchés immobiliers tournés à la hausse,
- Une décote pour les immeubles non « verts », dans le cadre de marchés immobiliers tournés à la baisse.

Cette « valeur verte » apparaîtra plus facilement dans des marchés immobiliers détendus que dans des marchés immobiliers tendus.

#### 4/ Quelle avancée représente la certification « HQE® Exploitation » ?

La certification « HQE® Exploitation », dans sa version « Exploitation et Utilisation », où l'utilisateur est impliqué, représente une avancée importante vers la prise en compte des performances réelles des immeubles et met en place les bases d'une coopération inédite entre propriétaire/gestionnaire, utilisateur et exploitant.

#### 5/ Quelles transformations du système d'acteurs de la construction et de l'immobilier sont nécessaires pour un pilotage par les performances réelles?

La conception doit considérer la qualité d'usage comme la caractéristique première d'un immeuble de bureaux « vert ». La température, la qualité de l'air, la lumière, la ventilation, l'acoustique, le confort visuel, le confort olfactif participent à ce « confort vert ». L'occupant doit pouvoir maîtriser lui-même son environnement immédiat. La participation de l'utilisateur, quand il est connu, à la conception est souhaitable.

La conception d'un immeuble « vert » doit intégrer de façon opérationnelle la dimension exploitation maintenance. Un moyen est d'associer l'exploitant à la conception, notamment pour le choix des équipements.

La performance environnementale intrinsèque de l'immeuble « vert », avant exploitation et usage, est fondamentale. Il serait logique que les participants à l'acte de construire ou de rénover soient rémunérés en fonction de cette performance environnementale intrinsèque. Une garantie de performance, attestée par une tierce partie et fondée sur une assurance, pourrait conforter la démarche.

Les métiers de propriétaire/gestionnaire, d'utilisateur et d'exploitant sont en train d'évoluer avec l'émergence de la notion de performance environnementale réelle des immeubles. La certification « HQE® Exploitation » est très complémentaire de la mise en place de l'annexe verte au bail et de contrats énergétiques performanciers.

Onze recommandations sont formulées pour les professionnels de la construction et de l'immobilier et les certificateurs.

## INTRODUCTION

L'immobilier représente en France 45 % de la consommation d'énergie et 20 %<sup>2</sup> des gaz à effet de serre. L'immobilier « vert » à performances énergie-environnement élevées se développe fortement, notamment sous la forme de bâtiments certifiés. Ces certifications portent sur la programmation, la conception et la réalisation des immeubles avant exploitation et utilisation. Il s'agit donc de performances conventionnelles, définies à partir des caractéristiques techniques des immeubles et des équipements, d'hypothèses sur la température extérieure et sur l'utilisation future des immeubles (température intérieure, durée d'occupation...).

Mais quelles sont les performances réelles ? Les performances réelles des immeubles certifiés « verts » sont-elles conformes aux prévisions ? En d'autres termes, les immeubles « verts » tiennent-ils leurs promesses ? N'y a-t-il pas un lien entre performances énergétiques et environnementales et valeur des immeubles ? Et si les performances réelles ne sont pas au rendez-vous, la valeur de l'immeuble n'est-elle pas moindre qu'espérée ?

Sur ces questions, le CSTB et CERTIVEA, filiale du CSTB, certificateur « HQE® » pour l'immobilier tertiaire, nous ont confié la présente étude, centrée sur les bureaux certifiés « HQE® Exploitation », certification qui porte non seulement sur la qualité environnementale intrinsèque des immeubles, mais aussi sur la qualité environnementale de la gestion-exploitation et de l'utilisation<sup>3</sup>.

*L'étude se propose de donner des éléments de réponse à cinq questions :*

- *Quelles sont les performances réelles des immeubles de bureaux certifiés ?*
- *Va-t-on vers la mesure des performances réelles ?*
- *Quel lien y a-t-il entre valeur immobilière et performances ?*
- *Quelle avancée représente la certification « HQE® Exploitation » ?*
- *Quelles transformations du système d'acteurs de la construction et de l'immobilier sont nécessaires pour un pilotage par les performances réelles ?*

La méthode utilisée pour répondre à ces cinq questions a deux volets, l'analyse de plusieurs études et recherches françaises et étrangères et les interviews de onze dirigeants

---

<sup>2</sup> 36 % en moyenne dans l'Union Européenne, 40 % aux Etats-Unis. Le chiffre, moins élevé en France, est du au fait que près de 80 % de l'électricité est d'origine nucléaire décarbonée.

<sup>3</sup> Le nom complet de cette certification est « NF Bâtiments Tertiaires en Exploitation Démarche HQE® ». Le nom de la certification portant sur la programmation, conception et réalisation des bureaux est « NF Bâtiments Tertiaires Démarche HQE® ». Dans la suite du texte, nous utiliserons les abréviations « HQE® Exploitation » et « HQE® ».

de six acteurs immobiliers du secteur tertiaire: deux investisseurs, deux utilisateurs et deux exploitants<sup>4</sup>.

Les études et recherches utilisées seront soit des analyses statistiques, soit des études de cas réels.

L'échantillon des personnes interviewées n'a bien sûr aucune représentativité statistique tant par le nombre que par les modalités de choix. Le nombre indique une méthode d'analyse qualitative visant à écouter les arguments développés par un nombre délimité d'acteurs concernés par les questions posées. Le critère de choix des acteurs a été l'existence chez ces professionnels d'une pratique d'opérations de bureaux certifiées, ou en cours de certification, « HQE® Exploitation »,

Les acteurs interviewés ont des pratiques environnementales sensiblement supérieures à la moyenne des professionnels de l'immobilier. L'intérêt est que, d'une part leurs pratiques représentent des solutions concrètes aux questions posées dans le débat actuel, et d'autre part elles ouvrent des pistes pouvant être progressivement suivies par l'ensemble des professionnels.

## **1/ QUELLES SONT LES PERFORMANCES REELLES DES IMMEUBLES DE BUREAUX CERTIFIES ?**

### **Une analyse statistique d'immeubles certifiés LEED**

Newsham, Mancini et Birt (2009)<sup>5</sup> commencent par analyser un certain nombre de recherches portant sur un petit nombre d'études de cas d'immeubles certifiés LEED aux Etats-Unis, avant de procéder à une analyse statistique.

Les auteurs d'une part comparent les performances énergétiques de cent immeubles tertiaires (bureaux et bâtiments publics) certifiés LEED avec 2 907 immeubles comparables de la base de données CBECS (Commercial Building Energy Consumption Survey), et d'autre part rapprochent le niveau de performance énergétique des immeubles certifiés avec le nombre de crédits énergie de la cotation LEED.

*En moyenne, les immeubles LEED ont une consommation énergétique inférieure de 18 à 39 %, selon les paramètres de comparaison, à celle des immeubles comparables non certifiés du parc. Mais de 28 à 35 % des immeubles LEED, selon les paramètres de comparaison, ont une consommation supérieure à celle d'immeubles comparables non*

---

<sup>4</sup> Voir la liste des personnes interviewées en annexe 1.

<sup>5</sup> Voir les références en annexe 4.

certifiés. Par ailleurs, il n'y a pas de lien régulier entre niveau de performance et nombre de crédits énergie obtenus dans la cotation LEED.

Les auteurs notent que leur recherche présente une limite, à savoir le fait que dans l'échantillon des données peuvent concerner la première année d'utilisation, qui est toujours une année de « rodage », et qui de ce fait n'est pas représentative d'une utilisation courante des immeubles.

Les auteurs indiquent que d'après les études de cas qu'ils citent, trois causes peuvent expliquer les différences entre prévisions et réalité :

- La construction des immeubles : réalisation différente de la conception initiale, technologies moins performantes que prévues,
- La gestion des immeubles, avec en particulier un « passage du témoin » mal maîtrisé entre constructeur et gestionnaire-exploitant,
- Une utilisation différente de celle qui était prévue dans la convention d'utilisation décrite dans les simulations, en particulier la durée d'occupation de l'immeuble.

### **Trois études de cas d'immeubles de bureaux certifiés HQE®**

Catarina et Illouz (2009) détaillent trois études de cas de bureaux. Ce sont les toutes premières opérations de bureaux certifiées HQE® en France.

*Le Bâtiment 270, réalisé par ICADE à Aubervilliers, d'une surface de 9 400 m<sup>2</sup> SHON, livré en octobre 2005, avait un objectif de 120 KWhef/m<sup>2</sup>/an<sup>6</sup> pour les usages dit réglementaires (chauffage/rafraîchissement, ventilation, eau chaude, éclairage, auxiliaires). Sa consommation réelle en 2007 a été de 170 KWhef/m<sup>2</sup>/an.*

*La cause essentielle de l'écart est le fait qu'un des locataires (un journal), au lieu d'occuper l'immeuble de façon ordinaire, l'occupe 7 jours sur 7, 24 heures sur 24. Si l'usage avait été conforme à une occupation usuelle (5 jours par semaine, 10h par jour), la consommation dite réglementaire aurait été de l'ordre de 120 KWhef/m<sup>2</sup>/an, soit une performance conforme aux prévisions.*

---

<sup>6</sup> Il convient de toujours indiquer avec précision l'unité utilisée. Nous emploierons le KWhef/m<sup>2</sup>/an ou le KWhep/m<sup>2</sup>/an selon qu'il s'agit d'énergie finale (ef) ou d'énergie primaire (ep). Sauf mention contraire, il s'agit de m<sup>2</sup> SHON (surface hors œuvre nette). En toute rigueur, pour être comparées aux consommations prévues, les consommations réelles doivent être corrigées des degrés jour unifiés (DJU), car les simulations prévisionnelles sont fondées sur les caractéristiques techniques de l'immeuble et des installations, sur des hypothèses de température extérieure et sur des hypothèses de comportement et d'usage (température intérieure et durée d'occupation notamment).

De plus, il était prévu que la température moyenne soit de 19°C en hiver et que la climatisation soit déclenchée quand la température atteint 26°C. En fait la température est de 22°C été comme hiver.

L'écart vient donc essentiellement de l'usage et en particulier de la durée d'occupation exceptionnelle de l'immeuble. Cet écart aurait été plus faible si le programme de l'opération avait prévu d'isoler la gestion étage par étage, ce qui, il est vrai, a un certain coût. L'immeuble a été programmé avec une installation de traitement d'air imposant un fonctionnement global quel que soit le nombre d'étages occupés.

La performance sur la qualité de l'air intérieur (niveau de poussière, teneur en CO<sub>2</sub>, niveau de bio contamination) est sensiblement supérieure à celle de trois immeubles non certifiés proches.

Par ailleurs, l'exploitation technique a été plus complexe que prévu. Les automatismes (température, lumière, stores) et l'impossibilité d'ouvrir les fenêtres ont été plutôt mal vécus par les utilisateurs. Pas ou peu d'information sur le caractère HQE® de l'immeuble n'a été transmise par les entreprises locataires à leurs salariés.

Pour mieux maîtriser la gestion-exploitation et l'usage, le propriétaire a fait ensuite certifier l'immeuble « HQE® Exploitation ».

*Le bâtiment Millénaire 1, réalisé également par ICADE, d'une surface de 31 700 m<sup>2</sup> SHON, livré en 2006 dans Paris 19<sup>ème</sup>, avait un objectif de 92 KWhef/m<sup>2</sup>/an pour les usages dits réglementaires. Sa consommation réelle en 2008 a été de 155 KWhef/m<sup>2</sup>/an. Le chauffage est conforme aux prévisions (48 KWhef/m<sup>2</sup>/an). L'écart provient de l'ensemble climatisation/ventilation, éclairage et eau chaude sanitaire (107 KWhef/m<sup>2</sup>/an au lieu de 44).*

L'analyse a montré que les causes de l'écart étaient dues :

- Aux modalités d'exploitation : horaires de fonctionnement du chauffage et de la climatisation non optimisés par rapport à l'occupation, consommations simultanées de chauffage et de climatisation, débits d'air excessifs, parking éclairé 24 heures sur 24.
- A l'usage : la température intérieure en hiver est supérieure à 22°C, la climatisation est mise en route dès 23°C.

Un plan d'action a été mis en œuvre pour réduire l'écart.

Comme pour le Bâtiment 270, pour mieux maîtriser la gestion-exploitation et l'usage, le propriétaire a fait depuis certifier l'immeuble « HQE® Exploitation ».

*Le troisième bâtiment étudié, un immeuble construit par l'INERIS, livré en 2005 à Verneuil en Halatte, est de moindre surface : 1 500 m<sup>2</sup> SHON. Sa performance énergétique prévue était de 106 KWh/m<sup>2</sup>/an pour les usages réglementaires et de 174 KWh/m<sup>2</sup>/an bureautique incluse. La consommation réelle en 2008, avec la bureautique, a été de 162 KWh/m<sup>2</sup>/an, soit une performance meilleure que prévue de 7 %.*

Le confort thermique, en hiver comme en été, n'est pas jugé totalement satisfaisant par les utilisateurs.

Les sources d'information en France sur les consommations réelles des immeubles de bureaux « HQE<sup>®</sup> » comparés à des immeubles comparables non « HQE<sup>®</sup> » sont inexistantes. Dans un exposé de l'IPD de juin 2010, des chiffres indiquent que dans l'échantillon étudié, dans les immeubles « HQE<sup>®</sup> », comparés aux immeubles non « HQE<sup>®</sup> », par occupant, la consommation d'énergie est 17% plus faible, la consommation d'eau est 43% moins élevée et les déchets sont 56% moins importants. Mais l'auteur s'empresse de préciser « compte-tenu de l'échantillon limité sur les immeubles « HQE<sup>®</sup> », les résultats sont à analyser avec précaution<sup>7</sup> ».

**Les immeubles certifiés auraient en moyenne des performances réelles sensiblement supérieures aux immeubles non certifiés, mais dans un certain nombre de cas, les performances réelles peuvent être inférieures aux prévisions<sup>8</sup>. Il est indispensable qu'en France, un dispositif de connaissance des consommations réelles dans les immeubles « HQE<sup>®</sup> » et non « HQE<sup>®</sup> » soit mis en place.**

### **Les trois causes de décalage entre performances théoriques et performances réelles**

Trois principales causes peuvent expliquer la différence entre prévision et réalité. La première est bien sûr une différence entre le comportement conventionnel des utilisateurs défini pour élaborer les prévisions et le comportement réel des utilisateurs. Le plus souvent, les performances théoriques des immeubles en matière d'énergie sont estimées, en fonction des DJU (Degrés Jours Unifiés) qui définissent la température extérieure, avec comme hypothèses une température intérieure en hiver de 19°C, un déclenchement du

---

<sup>7</sup> « Les indicateurs IPD 2010 de l'immobilier d'exploitation. Performances environnementales ». François Jussaume. 24 juin 2010.

<sup>8</sup> Un éventuel écart entre performances prévues et performances réelles ne concerne pas seulement l'immobilier tertiaire. Il concerne aussi le logement. Voir la recherche relative à une opération de logements certifiés Minergie<sup>®</sup> près de Genève : Zraggen et alii (2006).

refroidissement à partir de 26°C en été et une durée d'occupation de 5 jours par semaine, 10 heures par jour.

Nous avons ainsi constaté que le Bâtiment 270 d'ICADE, apparemment peu performant, est en fait performant comme prévu quand on simule une occupation conforme aux prévisions.

De plus la première année après la livraison de l'immeuble ou après les travaux de rénovation est le plus souvent une année de « rodage » pendant laquelle, dans certains cas, le séchage de l'immeuble implique une surconsommation provisoire, et surtout se fait l'ajustement de l'exploitation et du comportement des utilisateurs.

*Pour mesurer les performances d'un immeuble « vert », il convient de :*

- *Mesurer ses performances la deuxième année après la livraison, la première année étant le plus souvent une année de rodage pour l'exploitant et les utilisateurs et, dans certains cas, une année de séchage de l'immeuble,*
- *De tenir en compte de la température extérieure, au travers de la méthode des DJU (Degrés Jours Unifiés),*
- *De prendre en compte les différences entre le comportement conventionnel prévu des utilisateurs et leur comportement réel, concernant en particulier les températures intérieures pratiquées en hiver et en été, le nombre de personnes présentes, la consommation bureautique par poste de travail et la durée d'occupation des locaux dans l'année.*

La seconde cause de décalage entre prévision et réalité peut être liée à des difficultés de gestion et de pilotage de l'installation technique. La coupure forte qui existe dans le bâtiment entre les acteurs de la construction et ceux de la gestion-exploitation doit être remise en cause. Ces derniers doivent être associés aux choix dans la phase de conception et un équilibre doit être trouvé entre efficacité de l'installation et facilités de gestion.

La troisième cause possible peut concerner la programmation, la conception et la réalisation de l'immeuble. Des équipements une fois installés peuvent être moins performants que prévus. Une programmation peut être inadaptée à la gestion, comme nous avons noté dans le cas du Bâtiment 270 où le programme ne prévoyait pas une gestion séparée par étage, alors que ce dernier a été loué par étage indépendant.

Nous reviendrons dans les quatrième et cinquième parties sur ces importantes questions en utilisant notamment la recherche CSTB-ICADE qui définit des enseignements sur les rapports entre performances et usages, les métiers, les rapports entre acteurs et les outils<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Les enseignements de l'étude CSTB-ICADE sont reproduits en annexe 2.

**En résumé, les décalages entre performances théoriques et performances réelles peuvent avoir trois causes :**

**- La première peut être une différence de l'utilisation par les occupants avec les prévisions conventionnelles, en particulier sur les températures extérieure et intérieure, le nombre de personnes présentes, la consommation bureautique par poste de travail et la durée d'occupation,**

**- La seconde peut être due à des difficultés de gestion et de pilotage de l'installation technique,**

**- La troisième peut être relative à la conception et à la réalisation de l'immeuble, avec par exemple certains choix de conception inadaptés à la gestion ou des équipements une fois installés moins performants que prévu.**

## **2/ VA-T-ON VERS LA MESURE DES PERFORMANCES REELLES ?**

### **Les ambiguïtés du Grenelle de l'Environnement**

Les pouvoirs publics, aux trois niveaux, international, national et local, adoptent des plans de réduction des consommations d'énergie et d'émissions de CO2 avec des objectifs mesurés et datés.

Pour atteindre les objectifs fixés par l'Union Européenne, la loi dite Grenelle 1 n° 2009-967 du 3 août 2009 a fixé pour la construction neuve un objectif de baisse d'environ 50 % de la consommation d'énergie entre les réglementations de 2005 et celle de 2012. Pour le parc immobilier existant, l'objectif est de moins 38 % en moyenne pour les 3,5 milliards de m<sup>2</sup> du stock entre 2009 et 2020.

Chaque région, département, commune et groupement de communes de plus de 50 000 habitants vont fixer des objectifs de baisse des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans leurs Plans Energie Climat Territoriaux.

Comment les objectifs du Grenelle de l'Environnement vont-ils être suivis ? Si les Diagnostics de Performance Energétique (DPE), centralisés par l'ADEME, constituent la base de suivi, la réponse est mixte, certains DPE étant des calculs conventionnels à partir de la méthode d'estimation dite 3CL, d'autres DPE étant calculés à partir des consommations réelles.

Pour le secteur tertiaire, le groupe du Plan Bâtiment Grenelle animé par Serge Grzybowski, Président d'ICADE, a proposé dans son rapport du 27 octobre 2009 que « la loi impose à l'utilisateur le relevé des consommations réelles globales en énergie finale, un calcul annuel normé et sa communication par les propriétaires à l'autorité indépendante qui centraliserait les consommations ». Le législateur n'a pas retenu cette proposition.



Selon l'un des investisseurs interviewés, le texte d'application sur l'annexe verte aux bail, prévu par l'article 8 de la loi Grenelle 2 n°2010-788 du 12 juillet 2010, devrait porter sur les consommations réelles. D'ailleurs, le groupe de travail « Valeur verte » du Plan Bâtiment Grenelle, animée par Méka Brunel, Directrice Générale Europe de la SITQ (Caisse de Dépôt et Placement du Québec), dont nous parlerons plus loin, recommande de rendre obligatoire dans le secteur tertiaire la transmission des consommations réelles du locataire au propriétaire.

Le texte d'application sur l'obligation de travaux dans le tertiaire pourrait également porter sur l'évolution des consommations réelles avant et après travaux.

*Malgré certaines ambiguïtés au départ, la tendance du Grenelle de l'Environnement va vers le suivi des consommations réelles, tout au moins pour le tertiaire.*

Notons par ailleurs que les appels à projet des conseils régionaux, en relation avec l'ADEME et le PREBAT, sur les opérations de construction et de rénovation basse consommation d'énergie comportent un suivi des consommations réelles pendant deux ans après la livraison des immeubles.

### **L'approche britannique**

Au Royaume-Uni, le Carbon Reduction Commitment (CRC) exige, depuis avril 2010, des 5 000 premiers consommateurs non industriels d'électricité l'envoi de leurs factures de consommation d'énergie à une agence publique. Sont concernés les banques, sociétés immobilières, opérateurs de transports, ministères, collectivités locales... qui consomment plus de 6 000 MWh d'électricité par an.

Le gouvernement publiera chaque année le classement des participants selon leur performance carbone mesurée à partir de leurs consommations réelles. Selon leur classement, les participants percevront une allocation ou paieront une pénalité. En 2011, les entités non performantes paieront une pénalité de 12 livres par tonne de CO2 émise en deçà d'un certain niveau de performance. En 2013, un marché de négociation et d'échange de crédits d'émission de CO2 permettra aux entités non performantes d'acheter des crédits aux organismes performants. Le non respect des obligations du CRC fera l'objet d'infractions pénales<sup>10</sup>.

### **Les utilisateurs s'intéressent aux performances réelles**

---

<sup>10</sup> Voir l'annexe 1 sur le CRC britannique dans le « Rapport sur l'obligation d'élaboration d'un bilan d'émissions des gaz à effet de serre prévue par l'article 26 du Projet de loi portant Engagement National pour l'Environnement », établi par Michel HAVARD. Documentation Française. Décembre 2009.

Avec les pouvoirs publics, certains investisseurs et les utilisateurs s'intéressent également aux performances réelles.

L'un des investisseurs interviewés lors de la présente étude a décidé il y a trois ans de faire un bilan des consommations énergétiques réelles de tout son patrimoine immobilier, avec cotation de chaque immeuble et estimation du coût de remise à niveau selon la réglementation thermique bâtiments existants 2007, elle-même fondée sur la réglementation thermique neuf 2005. Le coût du bilan avec cotation et estimation est de 5 à 10 000 € par immeuble.

Le bilan n'est pas limité aux consommations dites réglementaires mais couvre la totalité des consommations avec des situations de départ variant de 400 à 800 kWh/m<sup>2</sup>/an hors parkings. Cet investisseur a décidé qu'une proportion significative de son patrimoine (plus du quart) sera certifiée « HQE® Exploitation ».

*Une société foncière et immobilière française mesure chaque année les consommations réelles de son patrimoine immobilier entreprise, logistique, santé, hôtellerie et, sur cette base, s'est fixé l'objectif ambitieux de diminuer de 40 % entre 2008 et 2016 ses consommations mesurées en kWh/m<sup>2</sup>/an, avec un objectif intermédiaire de moins 23 % d'ici 2012.*

L'autre investisseur interviewé insiste sur la nécessité de mesurer les performances énergétiques réelles, et pas seulement celles des usages dit réglementaires. Il note sur cette question une évolution du comportement des utilisateurs.

Selon lui, la notion « verte » ne se limite pas à l'énergie, mais concerne aussi l'eau, les déchets, le confort des occupants et leur transport. Cet investisseur s'est fixé comme objectif de baisser de 10 % son Bilan Carbone entre 2007 et 2011.

Les deux utilisateurs interviewés dans le cadre de la présente étude se sont fixés des objectifs de mesure et de baisse des consommations réelles.

Dans son siège social certifié « HQE® Exploitation », l'un d'eux a d'abord investi 140 000 € en sous-compteurs. Le temps de retour de l'investissement, au prix actuel de l'énergie, est de 2,5 ans.

*Il s'est ensuite fixé des objectifs de baisse réelle entre 2009 et 2010 de 10 % pour l'électricité, de 5 % pour la production d'eau chaude, de 5 % pour la production d'eau glacée, de 5 % de consommation d'eau et de 8,5 % d'émission de CO<sub>2</sub>. Ces objectifs devraient être tous atteints et dépassés pour la consommation d'eau.*

L'autre utilisateur s'est fixé comme objectif sur son siège social, également certifié « HQE® Exploitation », une baisse réelle pour les consommations dites réglementaires de 127 KWhef/m<sup>2</sup>/an en 2009 à 92 KWhef/m<sup>2</sup>/an en 2010 puis à 80 KWhef/m<sup>2</sup>/an en 2011. L'étape suivante concernera l'ensemble des consommations incluant la bureautique.

*Le même utilisateur a décidé un plan d'action court terme de baisse des consommations réelles dans cinq agences régionales. La règle financière retenue était un temps de retour des investissements inférieur à 3,5 ans avec les prix actuels de l'énergie. Dans une agence, où l'immeuble était bien construit, bien orienté et bien géré, le temps de retour excédait nettement le maximum fixé. Dans les quatre autres agences, l'économie réelle des consommations s'est élevée en moyenne à moins 29 % après travaux, avec un temps de retour moyen de l'investissement de 3,1 ans.*

**En résumé, le mouvement est vers la mesure des performances environnementales réelles des immeubles tant de la part:**

- des pouvoirs publics, malgré quelques ambiguïtés du Grenelle de l'Environnement,
- et des professionnels de l'immobilier, en particulier les utilisateurs.

### **3/ QUELS LIEN Y A-T-IL ENTRE PERFORMANCES ET VALEUR IMMOBILIERE ?**

La question des performances est d'autant plus importante que des débuts de preuve d'un lien entre performances et valeur de l'immeuble commencent à apparaître, essentiellement sur le marché des bureaux américains. Sur ce marché, des centaines d'immeubles de bureaux certifiés Energy Star ou LEED ont été loués, occupés et revendus<sup>11</sup>.

#### **Certifications Energy Star et LEED et valeur immobilière**

*Il faut au départ préciser un problème de méthode : il convient de comparer des immeubles certifiés et non certifiés les plus comparables possibles.*

Quand dans la première partie de leur article Miller, Spivey, Florance (2008) indiquent entre des bureaux certifiés LEED et immeubles non certifiés une différence de loyer de 36 % et une différence de prix de vente de 64 %, ces chiffres, comme le note Muldavin (2008), sont faux. Les auteurs se contentent de définir ainsi la catégorie d'immeubles étudiée : immeuble de classe A (standing), de plus de 200 000 pieds carrés, d'au moins cinq étages, construits après 1970, en multi-location.

<sup>11</sup> Il existe également dans le secteur du logement plusieurs études de la Banque Cantonale de Zurich sur la survaleur dégagée par le label suisse Minergie, plusieurs milliers d'immeubles certifiés ayant été loués, occupés et revendus en Suisse: voir Banque Cantonale de Zurich « Minergie macht sich bezahlt », 2008.

Dans cette catégorie très hétérogène, la forte différence de loyer et de prix a de fortes chances de provenir du fait que les immeubles LEED sont plus récents, mieux situés et plus confortables que les immeubles non LEED. Ces chiffres sont inexploitable.

Pour comparer des immeubles comparables, il faut utiliser la méthode dite des prix hédoniques, qui tend à neutraliser les caractéristiques, autres que la certification, qui influencent loyer et prix : localisation, âge, confort, état du marché... avec une formule du type :

$$P = \alpha + \beta_1 C_1 + \beta_2 C_2 + \dots + \beta_e C_e + \beta_i C_i + \dots + \beta_n C_n + \varepsilon$$

où P est le loyer ou le prix de revente au m<sup>2</sup>,  $\alpha$  une constante,  $\beta_i$  le coefficient de régression de chaque caractéristique i,  $C_i$  la caractéristique i,  $C_e$  étant la caractéristique énergie environnement, le plus souvent aux Etats-Unis définie par la présence d'une certification Energy Star et/ou LEED, et  $\varepsilon$  le terme d'erreur ou résiduel.

Quatre recherches utilisent la base de données américaine CoStar. Eichholtz, Kok, Quigley (2009) étudient trois variables : loyer, taux d'occupation, prix de revente d'immeubles certifiés Energy Star et LEED comparés à des immeubles de caractéristiques comparables non certifiés.

L'échantillon étudié porte, pendant la période 2004-2007, sur 694 immeubles loués certifiés comparés à 7 488 immeubles non certifiés et sur 199 immeubles certifiés revendus comparés à 1617 immeubles revendus non certifiés.

Les immeubles certifiés ont en moyenne un loyer supérieur de 3 %<sup>12</sup>, un revenu locatif (loyer multiplié par le taux d'occupation) supérieur de 6 %, et un prix de revente supérieur de 16 %. Notons que selon cette recherche, ces différences ne concernent que les immeubles certifiés Energy Star. Il n'y a pas de différence entre les immeubles certifiés LEED et les immeubles non certifiés.

Dans une seconde recherche (Eichholtz, Kok, Quigley (2010)), les auteurs analysent l'évolution du différentiel entre immeubles certifiés et immeubles non certifiés comparables pendant la crise immobilière, en comparant la situation en septembre 2007 et octobre 2009.

Dans leur échantillon, les loyers ont baissé en deux ans en moyenne de 5,4%. Les immeubles certifiés résistent mieux et maintiennent un avantage vis-à-vis des immeubles non certifiés comparables mais le différentiel diminue : il est de 1,2 % pour les loyers et de

---

<sup>12</sup> La prime locative donnée aux immeubles « verts » est d'autant plus forte qu'aux Etats-Unis, les loyers sont souvent définis charges comprises, l'utilisateur ne bénéficie donc pas des économies générées par l'immeuble « vert ».

2,4 % pour les revenus locatifs. Pour les prix de revente, le différentiel est en moyenne de 13 % en faveur des immeubles certifiés.

L'analyse de Fuerst et McAllister (2009) porte sur environ 200 immeubles LEED, un millier d'immeubles Energy Star et 16 000 immeubles non certifiés, présents dans la base de données CoStar début 2009. Avec des définitions de caractéristiques qui ne sont pas les mêmes, Fuerst et McAllister trouvent un delta de loyer plus élevé, égal à 6 %, mais à la différence de Eichholtz, Kok, Quigley le loyer supérieur caractérise autant les immeubles Energy Star que les immeubles LEED.

Leurs chiffres sont plus étonnants pour les valeurs de revente : plus 31 % pour les immeubles Energy Star, plus 35 % pour les immeubles LEED.

Dans la deuxième partie de leur article déjà cité, Miller, Spivey, Florance utilisent la méthode des prix hédoniques avec un échantillon plus restreint pendant la période 2005-début 2008: une vingtaine d'immeubles LEED, 600 immeubles Energy Star et 2 000 immeubles non certifiés. Ils n'analysent que le prix de revente et aboutissent à une différence plus raisonnable que celle évoquée dans la première partie de leur article: plus 6 % pour Energy Star, plus 10 % pour LEED.

Pyvo et Fisher (2009) utilisent la méthode des prix hédoniques mais avec une autre base de données, la base NCREIF (National Council of Real Estate Investment Fiduciaries). Leur recherche porte sur 203 immeubles Energy Star comparés à 4 257 immeubles non certifiés analysés entre 1998 et 2008. Les données sont plus riches sur le plan financier que dans les trois recherches déjà citées.

Le revenu net par pied carré est supérieur en moyenne de 5,9 % pour les immeubles Energy Star. Cette différence s'explique par un niveau de loyer supérieur de 4,8 %, un taux d'occupation supérieur de 0,9 % et une dépense de fluides inférieure de 9,8 %. La valeur de marché est supérieure de 13,5 %.

Le taux de capitalisation est inférieur de 0,5%. Le taux de capitalisation étant le rapport entre loyer et valeur, un taux plus faible est un signe positif pour Energy Star car il signifie que l'investisseur pense courir un risque moins élevé avec un immeuble Energy Star qu'un immeuble non certifié.

L'évolution dans le temps de la valeur de marché des immeubles Energy Star n'est pas supérieure à celle des immeubles non certifiés. Les investisseurs ont engrangé la prime Energy Star au début avec un niveau de loyer et une valeur de marché plus élevés. Leur bien ne se valorise pas ensuite mieux que les autres.

Le rendement global (revenus et plus value de prix de vente) est comparable pour les immeubles Energy Star et les immeubles non certifiés.

**La conclusion générale de ces recherches est la suivante: en tendance, sur le marché américain, un immeuble de bureaux « vert » se loue plus cher, a un taux d'occupation plus élevé et a un prix de revente plus fort qu'un immeuble « non vert » de caractéristiques comparables.**

On pourra s'étonner des différences de chiffres entre les recherches, en particulier entre les trois qui utilisent la même base de données. Cela s'explique par le fait que les différentes définitions des caractéristiques (qu'il faut toujours chiffrer) ne font qu'approcher, avec plus ou moins de bonheur, la complexité des mécanismes de marché qui définissent les montants de loyer et de prix de revente d'un immeuble de bureaux.

En France, il faudra attendre que plusieurs centaines d'immeubles labellisés Haute Performante Énergétique, Effinergie® Bâtiment Basse Consommation, Haute Qualité Environnementale® soit livrés, loués et revendus pour produire les mêmes recherches.

Les chercheurs auront d'ailleurs à affronter une grande difficulté : la forte opacité du marché des bureaux français comparée à la transparence du marché américain. Dans ce dernier, il est possible de connaître les loyers réellement pratiqués, contrairement au marché français où le loyer facial est souvent loin du loyer réel.

### **Les approches du Groupe Valeur Verte du Plan Bâtiment Grenelle et du Groupe « Valeur Verte en Pratique »**

Le rapport du Groupe Valeur Verte du Plan Bâtiment Grenelle, animé par Meka Brunel, déjà cité, porte sur le secteur des bureaux.

*Il diagnostique une rentabilité potentielle plus élevée et certains avantages d'un immeuble « vert » du fait d'une possibilité:*

- *D'un loyer plus élevé,*
- *De charges moins fortes,*
- *D'un prix de revente plus élevé,*
- *D'une « liquidité locative » plus élevée (commercialisation plus rapide<sup>13</sup>, vacance plus faible),*
- *D'une « liquidité à la vente » plus élevée (vente plus rapide, travaux de remise à niveau plus faibles),*

<sup>13</sup> Voir Jones Lang LaSalle. « L'antisèche de l'immobilier durable ». Novembre 2009, page 8.

- *D'un financement plus facile (risque moins élevé, travaux de remise à niveau moins importants)*
- *D'une productivité des salariés potentiellement plus élevée,*
- *De communication institutionnelle sur l'immobilier « vert ».*

*Le groupe insère sa réflexion dans la conjoncture actuelle et définit deux scénarios :*

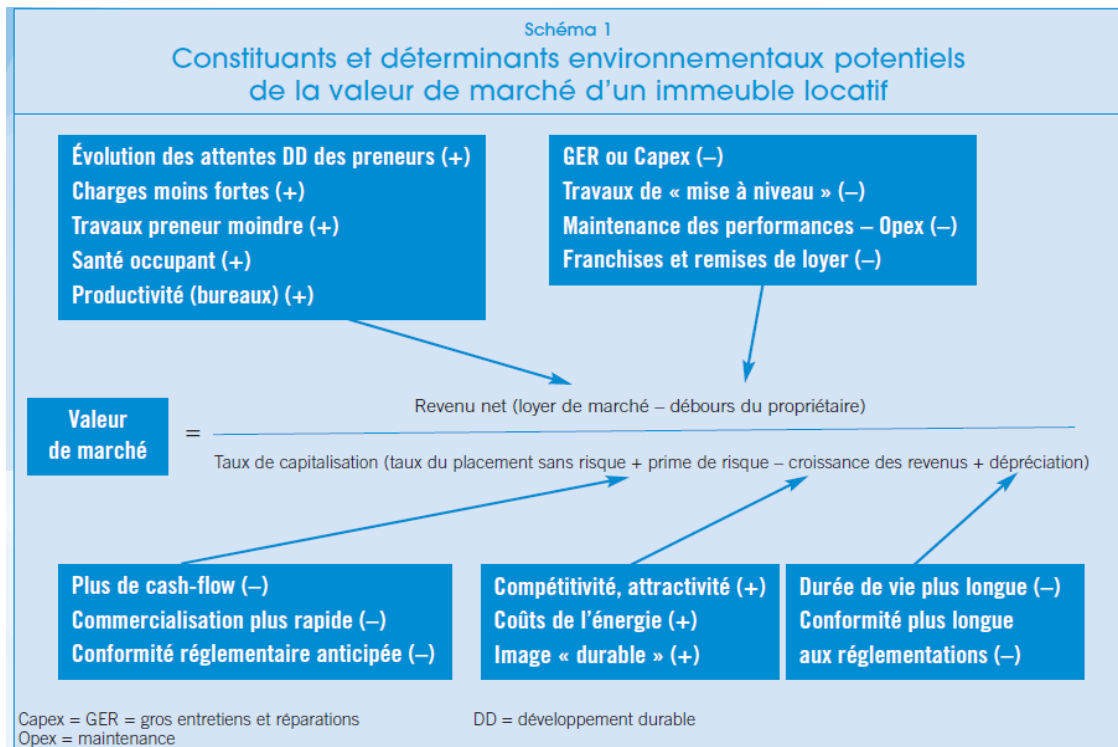
- *Si le cycle immobilier devient haussier, il y a une possibilité de prime (loyer, prix de revente) pour les immeubles « verts »,*
- *Si le cycle immobilier ne repart pas à la hausse, il y a un risque élevé de décote des immeubles non « verts », les immeubles « verts » devenant la nouvelle référence du marché.*

Dans tous les cas, l'ampleur des travaux sur le parc existant pour atteindre les objectifs du Grenelle de l'Environnement est telle que le groupe propose des mesures d'ordre légal et fiscal pour faciliter ces travaux et les financer.

Nous ajoutons que la valeur verte apparaîtra plus dans les marchés immobiliers détendus que dans les marchés tendus, où la pression de la demande est telle que la performance environnementale sera moins discriminante que dans un marché détendu.

Un groupe de réflexion sur la « Valeur verte en pratique », dont nous faisons partie, a produit par ailleurs une analyse portant sur les logements et les bureaux qui sont possédés par des propriétaires institutionnels (Bouteloup et alii, 2010).

Le groupe part de la définition de la valeur immobilière, rapport du loyer moins débours propriétaire sur le taux de capitalisation, et de l'influence potentielle des performances environnementales sur les déterminants de la valeur d'un immeuble :



Source : David Lorentz dans Bouteloup et alii (2010).

Le groupe évalue, à dire d'expert, l'impact à court et à moyen terme de l'influence de la performance énergie-environnement-santé sur les cinq déterminants de la valeur : loyer, débours propriétaire, prime de risque, croissance des revenus du propriétaire, dépréciation de l'immeuble (cf tableau page suivante).

*Sur la base de l'hypothèse d'un lien entre performances énergie-environnement-santé réelles et valeur immobilière, il suggère que pour garantir la valeur « verte », il faut garantir les performances réelles. Il indique qu'une telle garantie nécessite une transformation profonde des rapports entre trois acteurs : le propriétaire, responsable de la qualité environnementale intrinsèque du bâti, l'utilisateur, responsable de la qualité environnementale de l'utilisation et l'exploitant, responsable de la qualité environnementale de l'exploitation.*

Cela passe par de nouvelles relations contractuelles entre les trois acteurs : contrats de performance, annexe verte au bail, contrat tri partite.



Tableau 1					
Constituants de la valeur de marché	Déterminants impactés (+) à la hausse (-) à la baisse	Niveau d'impact			
		Logement locatif		Bureau locatif	
		CT	MT	CT	MT
Loyer de marché	Attentes développement durable de la demande (+)	→	↗	↗	↑
	Charges moins fortes (+)	↗	↑	→	↗
	Travaux preneur moindres (+)	→	→	→	→
	Santé occupant (+)	→	↗	↗	↑
	Productivité occupants (bureaux) (+)			→	↑
Débours propriétaire	Gros entretien et réparations (-)	↗	↗	→	→
	Coûts de « remise à niveau » et de réhabilitation (-)	↗	↑	↗	↑
	Maintenance des performances (-)	→	↗	→	↗
	Franchises et remises de loyer (bureaux) (-)			↗	↑
Prime de risque	Plus de cash-flow (-)	→	↗	↗	↑
	Commercialisation plus rapide (-)	↗	↑	↑	↑
	Conformité réglementaire anticipée (-)	↗	↑	↗	↑
Croissance des revenus du propriétaire	Compétitivité, attractivité (+)	→	↗	→	↗
	Coûts de l'énergie (+)	↗	↑	→	↗
	Image « durable » (+)	→	↗	→	↗
Dépréciation	Durée de vie plus longue (-)	↗	↑	↗	↑
	Conformité plus longue aux réglementations (-)	↗	↑	↗	↑

#### Légende

→	Influence nulle ou faible sur la différence de valeur
↗	Influence significative sur la différence de valeur
↑	Influence importante sur la différence de valeur
CT	Influence à court terme
MT	Influence à moyen terme

Source : Bouteloup et alii (2010).

## **Investissement, performances conventionnelles, performances réelles**

Les deux investisseurs interviewés partagent l'idée d'un risque de décote important des immeubles non « verts ».

L'un rappelle que l'obligation de travaux de rénovation énergétique prévue par l'article 3 de la loi Grenelle 2 n°2010-788 du 12 juillet 2010 fait courir un risque élevé aux immeubles nécessitant des travaux importants.

Il rappelle que la certification HQE® ne peut à elle seule lutter contre le risque de décote. Les questions de la qualité de la localisation, en particulier la desserte en transports en commun, et la qualité d'usage, tenant compte des besoins, informatiques en particulier, et des habitudes des utilisateurs (présence de faux plafonds et faux planchers notamment) sont deux facteurs déterminants.

Des immeubles HQE® ayant une mauvaise desserte de transports en commun présentent un risque élevé de vacance dans certaines localisations.

L'autre investisseur note qu'un immeuble HQE®, en tendance, se loue plus vite, se loue mieux (meilleures signatures d'utilisateurs) et fidélise mieux les locataires.

Quand on prend la formule usuelle de la valeur immobilière déjà évoquée (loyer moins capex<sup>14</sup> sur taux de capitalisation), « le vert entre par les capex ». Auparavant, les dépenses prévisionnelles de travaux de remise à niveau étaient évaluées de manière standard. Elles font maintenant l'objet d'analyses approfondies anticipant les réglementations thermique 2012 et 2020, fondées sur un rapport inédit entre l'analyste financier et la direction technique. Le financement est difficile quand l'immeuble n'est pas encore amorti.

Cet investisseur préfère, en matière de valeur verte, parler de « confort vert » plutôt que de performance énergétique. Trois éléments jouent un rôle important dans ce « confort vert » : l'éclairage, le renouvellement d'air (qui doit éviter les déplacements d'air) et la climatisation. Selon lui, le confort doit être la préoccupation principale d'un immeuble de bureaux HQE®.

En matière de valeur, notons qu'un des utilisateurs interviewés a indiqué que le propriétaire avait décidé une hausse significative de la valeur faciale du loyer, arguant notamment de la valorisation apportée par la certification « HQE® Exploitation ».

---

<sup>14</sup> Capex veut dire Capital Expenditure, en simplifiant il s'agit des travaux de remise à niveau d'un immeuble.

La première recherche citée de Eichholtz, Kok, Quigley qui met en évidence une prime uniquement pour les immeubles certifiés Energy Star et non pour les immeubles LEED tend à indiquer que les investisseurs américains ont eu tendance, pendant la période étudiée, à donner une prime à la performance énergétique plus qu'à la performance environnementale, cette performance énergétique étant la performance réelle.

En effet la certification Energy Star, pour le tertiaire, est délivrée sur la base de l'analyse des consommations réelles de l'immeuble comparées à celles du parc mesurées chaque année dans le cadre d'une grande enquête réalisée sous l'autorité du ministère de l'Energie américain. En fonction de la zone climatique et des caractéristiques de l'immeuble, l'immeuble est noté de 0 à 100, il obtient la certification si sa note est égale ou supérieure à 75. Un immeuble tertiaire Energy Star est donc dans les 25 % les meilleurs du parc américain.

A l'inverse la certification LEED, comme la certification HQE®, est fondée sur des consommations conventionnelles.

Mais les recherches de Fuerst et Miller concluent à une prime donnée à la fois aux immeubles Energy Star et LEED.

On peut émettre l'hypothèse que, dans un premier temps, la survaleur peut être fondée sur des performances indifféremment conventionnelles ou réelles, l'important étant pour l'investisseur qu'elle soit certifiée par un organisme indépendant.

Dans un deuxième temps, on peut penser que vu l'évolution de la réglementation (Carbon Reduction Commitment, annexe verte au bail...) et l'intérêt des utilisateurs et, progressivement, des investisseurs pour les performances réelles, le lien se fera entre valeur immobilière et performances réelles.

**En résumé, le lien entre performances environnementales et valeur immobilière est probable, à condition que l'immeuble « vert » respecte les fondamentaux de l'immobilier : qualité de la localisation et de la desserte en transports en commun, bonne qualité d'usage.**

**Cette « valeur verte » pourra prendre deux formes :**

- **Une survaleur pour les immeubles « verts », dans des marchés immobiliers tournés à la hausse,**
- **Une décote pour les immeubles non « verts », dans des marchés tournés à la baisse.**

**La « valeur verte » apparaîtra plus facilement dans des marchés immobiliers détendus que dans des marchés immobiliers tendus.**

## 4/ QUELLE EST L'AVANCEE DE LA CERTIFICATION « HQE® EXPLOITATION » ?

### Le contenu de la certification « HQE® Exploitation »

La certification « HQE® Exploitation » représente un changement important dans le dispositif de la certification d'immeubles. Pour la première fois en Europe<sup>15</sup>, une certification ne porte pas seulement sur le potentiel théorique d'un immeuble à sa livraison, mais intègre l'exploitation et l'utilisation des immeubles.

« HQE® Exploitation » s'applique à des immeubles certifiés ou non certifiés « HQE® » au moment de la production.

Le référentiel de certification se décline en trois référentiels techniques :

- le Système de Management de l'Exploitation,
- la Qualité Environnementale des Bâtiments en Exploitation,
- la Qualité Environnementale des Pratiques.

Le *Système de Management de l'Exploitation (SMEx)* s'appuie au départ sur un inventaire initial (documentation, biens et équipements de l'ouvrage, diagnostic des exigences relatives à la Qualité Environnementale Intrinsèque de l'ouvrage) et sur l'engagement du porteur de la certification, qui peut être le propriétaire, l'utilisateur ou l'exploitant.

Il définit la mise en œuvre, le fonctionnement et le pilotage de l'exploitation : planification, responsabilités, compétences, contrats, communication, documentation, gestion des situations d'urgence, surveillance, évaluation de la qualité environnementale des bâtiments et des pratiques.

Le *référentiel Qualité Environnementale des Bâtiments en Exploitation (QEBE)* pour chacune des 14 cibles de la méthode HQE®<sup>16</sup> définit :

- la qualité environnementale intrinsèque de l'immeuble, avant exploitation et utilisation,
- la qualité environnementale de l'exploitation,

---

<sup>15</sup> La certification britannique BREEAM a depuis créé la version « BREEAM In Use » dont la démarche est proche de « HQE® Exploitation ».

<sup>16</sup> - Eco-construction : relation du bâtiment avec son environnement immédiat, choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction, chantier à faible impact environnemental,

- Eco-gestion : gestion de l'énergie, gestion de l'eau, gestion des déchets d'activité, maintenance-pérennité des performances environnementales,

- Confort : confort hygrothermique, confort acoustique, confort visuel, confort olfactif,

- Santé : qualité sanitaire des espaces, de l'air et de l'eau.

- les 3 niveaux de performance : de base, performant, très performant<sup>17</sup>.

Le référentiel définit également *quatre indicateurs chiffrés* : consommation de ressources énergétiques non renouvelables (en kWh d'énergie primaire), émissions de CO<sub>2</sub> (en Kg eq-CO<sub>2</sub>), consommation d'eau (en m<sup>3</sup>) et production de déchets (en Kg).

Le *référentiel Qualité Environnementale des Pratiques (QEP)* définit l'évaluation des pratiques du propriétaire, de l'exploitant et de l'utilisateur dans trois domaines, la communication, le management des espaces, les achats.

La certification « HQE® Exploitation » peut se décliner en quatre versions :

- *NF Bâtiments Tertiaires en Exploitation* si le niveau qualité environnementale intrinsèque du bâtiment n'est pas atteint,
- *NF Bâtiments Tertiaires en Exploitation Démarche HQE® Phase Engagement Exploitation*, si le bâtiment récent ou récemment rénové a moins de 20% des surfaces privatives occupées depuis plus d'un an,
- *Phase Exploitation* si plus de 20% des surfaces privatives sont occupées depuis plus d'un an,
- *Phase Exploitation et Utilisation* si plus de 50% des surfaces privatives sont occupées depuis plus d'un an, avec engagement des utilisateurs.

Dans les trois premiers cas, il n'y a pas d'engagement de l'utilisateur.

Au 23 février 2011, 28 opérations de bureaux sont certifiées, toutes en démarche HQE®: sept en phase Engagement Exploitation, douze en phase Exploitation, neuf en phase Exploitation et Utilisation<sup>18</sup>.

### **L'avis des entreprises interviewées**

Les entreprises interviewées sont favorables à la certification « HQE® Exploitation » mais émettent aussi des critiques et font des suggestions.

Certaines sont convaincues de la grande utilité de ce type de certification. Un investisseur indique qu'une partie significative de son parc (au moins un quart) doit être certifiée « HQE® Exploitation ». Un exploitant s'investit fortement dans la démarche en participant à plus d'une dizaine d'opérations certifiées ou en cours de certification.

---

<sup>17</sup> Pour être certifié, il faut avoir au minimum le niveau très performant pour 3 cibles, performant pour 4 cibles, de base pour 7 cibles.

<sup>18</sup> Voir la liste des opérations, avec les niveaux de performance par cible, en annexe 3.

L'utilité du référentiel Système de Management de l'Exploitation est particulièrement mise en avant par certains. Un utilisateur affirme : « *Nous sommes passés d'une situation où on gère l'immeuble avec beaucoup de gaspillages à une situation où on le gère de façon responsable* ». Un autre utilisateur indique que le référentiel Management est un bon cadre de travail pour l'exploitant. Comme l'indique de façon imagée un investisseur, la certification exige une exploitation de qualité à l'opposé de certaines pratiques anciennes dites « chiffon burette ».

Un utilisateur a décidé d'appliquer à son immeuble la certification « HQE® Exploitation » et les normes ISO 14 001 et EN 16 001<sup>19</sup>. Une importante valeur ajoutée de « HQE® Exploitation » par rapport aux deux normes mises en œuvre est la prise en compte du confort certifiée par un tiers. C'est important, en particulier dans les rapports avec les partenaires sociaux.

Un exploitant apprécie la souplesse de « HQE® Exploitation » qui permet de certifier à titre provisoire un immeuble vide (phase Engagement Exploitation qui devient phase Exploitation dès que 20 % des surfaces privatives sont occupées depuis plus d'un an.

Un investisseur pense que la « HQE® Exploitation » contribue à accroître la valeur de l'immeuble.

Un autre investisseur pense que « HQE® Exploitation » s'articule parfaitement avec l'annexe verte du bail, bientôt imposée par la loi Grenelle 2 à tous les bureaux et commerces de plus de 2 000 m<sup>2</sup>. Nous reviendrons sur cette importante remarque.

Les acteurs interviewés formulent également des critiques. Un investisseur trouve la procédure lourde et chère. Il intègre dans le coût non seulement le coût de la certification proprement dite mais aussi les études, le temps passé et les interventions nécessaires pour mettre à niveau l'immeuble et sa gestion. Il cite un montant de 100 000 € pour un immeuble de 9 000 m<sup>2</sup>. Un autre investisseur indique que la « lourdeur » du dossier dépend de la qualité de gestion de l'immeuble. La procédure n'est pas complexe pour un immeuble bien géré. Selon cet investisseur, le coût de la procédure, travaux et interventions annexes inclus est de l'ordre de 60 000 à 80 000 € pour un immeuble de bureaux francilien, la moitié pouvant être pris en charge par l'utilisateur<sup>20</sup>.

---

<sup>19</sup> La norme ISO 14 001 est une norme de management environnementale, la norme EN 16 001 est une norme de management énergétique. L'immeuble évoqué est le premier cas en France de certification selon la norme EN 16 001.

<sup>20</sup> Le coût de la certification seule est de l'ordre de 25 à 30 000 € échelonné sur 5 ans.

Une question soulevée à la fois par investisseur, utilisateur et exploitant est le coût de la remise à niveau des immeubles construits avant la réglementation thermique 2 000. Un investisseur indique que la certification britannique « BREEAM In Use » est sensiblement moins exigeante sur la qualité intrinsèque de l'immeuble que « HQE® Exploitation ».

Un utilisateur pense que la cible 9 sur le confort acoustique est difficile à atteindre dans certains cas.

Le fait que la procédure « HQE® Exploitation » ait prévu une version « NF Bâtiments Tertiaires en Exploitation » sans exigence sur la qualité intrinsèque de l'immeuble, n'est pas pour nos interlocuteurs une réponse à la question posée, car tous les acteurs concernés, investisseurs, utilisateurs, exploitants, tiennent absolument à bénéficier de l'appellation « HQE® ».

Un investisseur pense que l'utilisateur doit être partie prenante dans le processus, or la procédure « HQE® Exploitation » prévoit une version Exploitation sans coopération de l'utilisateur.

Une critique forte formulée par un utilisateur et les deux exploitants est l'absence de graduation dans la certification<sup>21</sup>. Comme l'indique un utilisateur, *« on n'a pas de point de repère, on se compare à nous-même, or on voudrait se comparer aux autres, y compris pour le confort et la santé »*.

### **Les suggestions faites par les professionnels**

Les acteurs font aussi des suggestions. Un utilisateur souhaite une communication beaucoup plus forte sur la certification « HQE® Exploitation » qui manque à son avis de notoriété. Il souhaite également une meilleure connaissance de « HQE® » à l'étranger et une avancée rapide des travaux de « Sustainable Building Alliance »<sup>22</sup> sur l'harmonisation et la comparabilité des différentes certifications au niveau international.

Un investisseur souhaite que « HQE® » accorde plus d'importance aux transports des utilisateurs, avec un indicateur du type distance aux transports en commun.

Un exploitant décrit une progression en quatre étapes :

---

<sup>21</sup> Contrairement à la certification BREEAM qui définit quatre niveaux (correct, bon, très bon, excellent), la certification HQE® est délivrée, comme on l'a vu, avec au minimum trois cibles très performantes, quatre cibles performantes et sept cibles de base, sans graduation d'ensemble.

<sup>22</sup> Voir [www.sballiance.org](http://www.sballiance.org)

- *La certification « HQE® », neuf ou rénovation, définit des exigences sur la qualité intrinsèque de l'immeuble, c'est-à-dire les performances potentielles de l'immeuble avant exploitation et utilisation,*
- *La certification « HQE® Exploitation », version « Exploitation » seule, permet la mesure des performances réelles,*
- *La certification « HQE® Exploitation », version « Exploitation et Utilisation », associe l'utilisateur au suivi de la performance et organise, de fait, un début de concertation entre propriétaire, utilisateur et exploitant.*
- *Il conviendrait maintenant d'aller plus loin en articulant « HQE® Exploitation et Utilisation » et un dispositif tri partite, propriétaire, utilisateur, exploitant, comprenant un contrat de performance énergétique, avec objectifs de performance, et l'annexe verte au bail.*

Nous allons revenir dans la partie suivante sur cette analyse qui rejoint l'observation de l'investisseur souhaitant une forte articulation entre « HQE® Exploitation » et annexe verte au bail.

**La certification « HQE® Exploitation », dans sa version « Exploitation et Utilisation », représente une avancée importante vers la prise en compte des performances réelles des immeubles et met en place les bases d'une coopération inédite entre propriétaire/gestionnaire, utilisateur et exploitant.**

## **5/ QUELLES TRANSFORMATIONS DU SYSTEME D'ACTEURS DE LA CONSTRUCTION ET DE L'IMMOBILIER SONT NECESSAIRES POUR UN PILOTAGE PAR LES PERFORMANCES REELLES?**

A une question si ambitieuse, nous ne donnerons que des éléments de réponse, qui tiendront notamment compte du contenu des entretiens réalisés lors de la présente étude, de la recherche PREBAT « Retour d'expérience de bâtiments de bureaux certifiés HQE® » et de l'article « Evaluer et garantir la valeur verte ».

### **Qualité d'usage, maintenance exploitation et conception**

Les utilisateurs interviewés sont catégoriques : l'important est pour l'un « le confort, le bien-être et la santé » des occupants et pour l'autre « le confort et les conditions de travail ». Comme nous l'avons noté, confort et santé sont une valeur ajoutée importante de la certification « HQE® » par rapport à des démarches comme ISO 14 001 et EN 16 001.



La température est un élément important. La réglementation française limitant la température à 19°C<sup>23</sup> est difficile à appliquer. Mais une évolution est possible. Un utilisateur a commencé par fixer la température dans son siège social certifié « HQE® Exploitation » à 23°C, + ou – 1,5°C, avec maintien en été de cette température. Au bout d'un certain temps de sensibilisation et de négociation, la température a été baissée à 20°C, + ou – 1,5°C, avec montée en été à 25°C, + ou – 1,5°C.

Outre la température, des éléments du confort pour un utilisateur sont la qualité de l'air, l'acoustique, l'olfactif et le visuel. La ventilation est un élément essentiel. Un investisseur veut supprimer les déplacements d'air et évite d'utiliser les ventilo-convecteurs. La lumière est également un élément important.

*Bref, la qualité d'usage d'un immeuble « vert » est une valeur première. Un investisseur met en avant la notion de « confort vert ». Comme le disent joliment Orlando Catarina et Sébastien Illouz dans leur recherche sur le retour d'expérience HQE®, « l'efficacité énergétique doit être soluble dans la qualité d'usage ».*

Les concepteurs doivent donc avoir le confort et le bien-être des occupants comme première priorité.

La façon dont ce confort est géré est essentiel. Le « tout automatique » a de sérieuses limites. Les occupants veulent maîtriser leur environnement immédiat eux-mêmes. Un utilisateur met en évidence l'intérêt de la télécommande individuelle qu'il a mis à la disposition de chaque salarié. Chacun peut ainsi influencer la température, la vitesse de la ventilation, l'intensité lumineuse, jusqu'à la couleur d'ambiance de la lumière, avec possibilité d'une dominante orange ou bleue selon le moment de la journée !

Quand l'utilisateur est connu, il est hautement souhaitable qu'il soit associé à la conception de l'immeuble.

---

<sup>23</sup> L'article R 131-20 du Code de la construction et de l'habitation indique « Dans les locaux à usage d'habitation, d'enseignement, de bureaux ou recevant du public et dans tous autres locaux, à l'exception de ceux qui sont indiqués aux articles R. 131-22 et R. 131-23, les limites supérieures de température de chauffage sont, en dehors des périodes d'inoccupation définies à l'article R. 131-20, fixées en moyenne à 19° C :  
- pour l'ensemble des pièces d'un logement ;  
- pour l'ensemble des locaux affectés à un usage autre que l'habitation et compris dans un même bâtiment ».

**La qualité d'usage doit être la caractéristique première d'un immeuble « vert ». La température, la qualité de l'air, la lumière, la ventilation, l'acoustique, le confort visuel, le confort olfactif participent à ce « confort vert ». L'occupant doit pouvoir maîtriser lui-même son environnement immédiat. Une façon d'améliorer la prise en compte de la qualité d'usage est d'associer, quand il est connu, le futur utilisateur à la conception de l'immeuble.**

Orlando Catarina et Sébastien Illouz mettent à juste titre fortement en avant la nécessité d'atténuer la profonde coupure qui existe entre la conception-construction ou rénovation et l'exploitation maintenance.

Ils indiquent que la base documentaire est essentielle. Les documents de conception destinés à l'exploitant ne doivent plus être un sous-produit de la conception mais des documents opérationnels pour un exploitant, régulièrement actualisés de manière vivante.

La question de la qualité du passage de la production à l'exploitation de l'immeuble est essentielle. La pratique du « commissionnement » issue de l'expérience américaine de « commissioning » vise, par un système qualité, à maintenir la performance dans la succession des phases programmation, conception, réalisation et exploitation.

Il faut aller plus loin, jusqu'à la participation de l'exploitant à la conception. Nous assistons aux premiers passages à l'acte. Un investisseur nous a indiqué que dans une de ses opérations, d'une taille de 15 000 m<sup>2</sup> en région lyonnaise, le futur exploitant est associé à la conception.

Un exploitant a mis en avant les trois bonnes pratiques qu'il commence à connaître. La première est *son association en tant qu'exploitant à la pré-livraison et la pré-réception de l'immeuble*, avec ensuite participation au suivi de la garantie de parfait achèvement d'un an.

La seconde bonne pratique est *son positionnement d'assistant à la maîtrise d'ouvrage (AMO) pour le choix des équipements* d'une opération.

La troisième est *sa participation, en tant qu'exploitant, à la conception* d'un immeuble, payée sur honoraires d'ingénierie.

**La conception d'un immeuble « vert » doit intégrer de façon opérationnelle la dimension exploitation maintenance. Un moyen est d'associer l'exploitant à la conception, notamment pour le choix des équipements.**

## Vers la garantie de la qualité environnementale intrinsèque de l'immeuble

Notre étude centrée sur la certification « HQE® Exploitation » met en avant les trois facteurs qui contribuent à la performance réelle des immeubles : la qualité environnementale intrinsèque de l'immeuble, celle de sa gestion-exploitation et celle de son utilisation.

La performance réelle est le résultat de l'articulation entre deux systèmes d'acteurs :

- *Le système maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entrepreneurs/industriels aboutit à la qualité environnementale intrinsèque de l'immeuble et aux performances théoriques,*
- *Le système propriétaire/gestionnaire, utilisateur, exploitant aboutit aux performances réelles.*

Il est important que la qualité environnementale intrinsèque de l'immeuble soit conforme aux prévisions. La certification « HQE® » programmation-conception-réalisation va dans ce sens.

Le système pourrait aller jusqu'à une garantie de performance, soutenue par un assureur, sur la base de laquelle le système propriétaire/gestionnaire, utilisateur, exploitant pourrait aller jusqu'aux résultats réels.

Un des moyens de faciliter cette performance théorique est la rémunération en fonction de la performance. Nous allons plus loin mettre en valeur des pratiques de rémunération des occupants en fonction des consommations d'énergie et des émissions de CO2 de l'immeuble dans lequel ils travaillent. Il serait logique que les acteurs amont, le monteur d'opération, l'équipe de maîtrise d'œuvre, l'entreprise, soient rémunérés en fonction de la performance environnementale de l'immeuble.

**La qualité environnementale intrinsèque de l'immeuble « vert » est fondamentale. Il serait logique que les participants à l'acte de construire ou de rénover soient rémunérés en fonction de cette qualité environnementale intrinsèque. Une garantie de performance, certifiée par un tiers et fondée sur une assurance, pourrait conforter la démarche.**

### Evolution des métiers de propriétaire/gestionnaire, d'utilisateur et d'exploitant et de leurs rapports

L'investisseur voit son approche modifiée. Un investisseur nous a décrit *l'irruption de l'analyse technique dans l'analyse financière*. Nous avons noté que la valeur verte « entrainé par les capex » (capital expenditure ou travaux de remise à niveau). La rentabilité financière de l'investissement, en particulier pour l'existant, dépend désormais fortement du coût de remise à niveau de l'immeuble. Quel est le coût de remise à niveau nécessaire pour résister

à l'obsolescence, notamment environnementale, provoquée par la concurrence d'immeubles performants mis sur le marché est devenue une question stratégique.

La dimension gestionnaire du propriétaire est également en train d'évoluer. D'une gestion d'immeuble centrée sur la maintenance, la gestion est désormais fondée sur le savoir mesurer, analyser, informer et agir. Cela se traduira par *une revalorisation du métier de « property manager », longtemps négligé au profit de celui d'« asset manager »*.

L'utilisateur d'immeubles de bureaux voit sa fonction profondément évoluer avec la gestion environnementale des immeubles. Devant la dilution des responsabilités sur la question environnementale, il est souhaitable que soit nommé un(e) responsable énergie, environnement, santé dans chaque immeuble ou groupe d'immeubles.

Contrairement à ce qui est souvent affirmé, il est possible de faire évoluer le comportement des occupants. Nous avons cité cet utilisateur qui a réussi progressivement à faire passer la température moyenne des bureaux de 23°C à 20°C.

Un autre utilisateur nous a indiqué des possibilités de changement sur le tri des déchets. Bien informés et sensibilisés, les occupants sont passés en deux ans d'une part de tri de 40 % à 60 % des déchets.

Un façon d'accélérer le changement de comportement est de lier l'intéressement salarial et les consommations. Un investisseur, dans sa fonction d'utilisateur d'immeubles, a introduit depuis trois ans *le calcul d'une quote part de l'intéressement salarial en fonction des consommations réelles d'énergie, d'eau et de papier* dans les bureaux où les occupants travaillent. Un utilisateur a fait de même avec une quote-part d'intéressement calculée en fonction des émissions réelles de CO<sub>2</sub> et des consommations réelles d'énergie et d'eau. Une partie du bonus du directeur de l'immobilier est calculée sur la même base.

Un investisseur se plaint que les utilisateurs n'acceptent pas de hausse de loyer liée à l'amélioration des performances environnementales de leur immeuble. Deux éléments vont faire évoluer à notre avis ce comportement. Le marché immobilier est cyclique, il est actuellement favorable aux locataires. Il deviendra favorable aux propriétaires lors de la prochaine phase du cycle. Dans cette future conjoncture, de telles hausses de loyer seront plus faciles à négocier. Par ailleurs le locataire a besoin de garantie de performance pour accepter de telles hausses<sup>24</sup>. Avec ces deux éléments, les hausses de loyer pour performance environnementale devraient être prochainement plus faciles à négocier.

---

<sup>24</sup> De telles pratiques commencent à voir le jour. Ainsi, dans un immeuble de bureaux à énergie positive, en échange d'une valeur faciale de loyer supérieure au loyer du marché, un promoteur immobilier garantit pendant 9 ans à l'utilisateur la totalité de ses consommations réelles s'il respecte un mode d'occupation pré

*Le métier d'exploitant est en train d'évoluer. L'exploitant traditionnel, qualifié de « chiffon burette » par un investisseur, ou imposant maladroitement la température de 19°C selon un autre investisseur, est en train de devenir un entreprise qui s'engage sur des performances réelles, avec pénalités financières en cas de non atteinte des résultats, et partage des gains avec le propriétaire en cas de dépassement des économies visées.*

La certification « HQE® Exploitation », dans sa version « Exploitation et Utilisation », contribue à créer des liens nouveaux entre propriétaire/gestionnaire, utilisateur et exploitant.

Cette certification est très liée, comme un investisseur nous l'a fait remarqué, à la réforme importante promue par l'article 8 de la loi Grenelle 2 du 12 juillet 2010. Celui-ci impose, pour les locaux de plus de 2 000 m<sup>2</sup> à usage de bureaux et de commerces, une annexe environnementale aux baux, pour tous les baux conclus ou renouvelés à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2012, et d'ici mi 2013 pour les baux en cours.

Cette annexe verte au bail va fortement modifier les rapports entre propriétaire et utilisateur. A minima, elle organisera des rendez-vous réguliers, la transmission des consommations réelles, l'analyse commune de ces consommations, un plan d'action pour améliorer les résultats. Avec des propriétaires et utilisateurs plus ambitieux, elle définira des exigences minimum pour les équipements utilisés et fixera des performances à atteindre.

La complémentarité entre certification « HQE® Exploitation » et annexe verte obligatoire au bail est très forte. La certification « prépare le terrain » de l'annexe verte, dans les domaines de l'exploitation et de l'utilisation. Sa valeur ajoutée est de certifier par une entité indépendante les améliorations relatives à l'exploitation et à l'utilisation, voire un jour les performances atteintes.

La certification « HQE® Exploitation » est également complémentaire de contrats à performance liant l'exploitant avec l'utilisateur ou le propriétaire. Ces contrats, soit de forme Contrat de Performance Energétique (CPE), soit d'autres formes de contrats avec performances, rencontrent notamment deux difficultés. La première est la définition de la situation de référence, qui sert de base à la définition de la performance. La seconde est le partage des responsabilités des performances (ou contre performances) entre gestionnaire, utilisateur et exploitant.

Un exploitant nous a indiqué qu'une situation de référence définie par les factures des années précédentes et les degrés-jour est très sujette à caution. Par contre une

---

défini : plateau ouvert, plage de travail 8h-20h, 13 m<sup>2</sup> par poste de travail, forfait bureautique de 12,6 KWhef/m<sup>2</sup>/an... (Les Echos, 13 janvier 2011).

méthode plus fine comme l'utilise le protocole de mesure IPMVP<sup>25</sup>, mis au point aux Etats-Unis sous la responsabilité du ministère de l'Energie et transposable en France, permet de mieux définir à la fois la situation de référence et le partage des responsabilités entre gestionnaire, utilisateur et exploitant.

Ces nouveaux rapports entre acteurs peuvent aller jusqu'à *un accord tri-partite entre propriétaire/gestionnaire, utilisateur et exploitant*. Un exploitant nous a donné un premier exemple, dans un immeuble de bureaux parisien. Ce contrat définit en valeur absolue les performances à atteindre pour les consommations de chauffage, de climatisation, d'éclairage et d'ascenseurs. Le poste consommation d'électricité liée à la bureautique a été mis en observation.

L'évolution de ces rapports entre acteurs centrée sur les performances environnementales devraient favoriser *l'allongement de la durée des contrats*. Il y a une forte contradiction entre d'une part performances environnementales, investissements matériels et immatériels nécessaires pour les atteindre, et d'autre part les pratiques usuelles des contrats d'un an tant pour les Facilities Managers, les Property Managers et les Asset Managers<sup>26</sup>.

L'évolution des rapports entre propriétaire/gestionnaire, utilisateur et exploitant sur les performances environnementales représentent un enjeu économique et financier très important, du fait du lien entre performances environnementales et valeur immobilière, comme le souligne l'article « Evaluer et garantir la valeur verte immobilière » déjà cité.

**Les métiers de propriétaire/gestionnaire, d'utilisateur et d'exploitant sont en train d'évoluer avec l'émergence de la notion de performance environnementale réelle des immeubles. La certification « HQE® Exploitation », qui dans sa version « Exploitation et Utilisation » jette les bases d'une coopération inédite entre propriétaire/gestionnaire, utilisateur et exploitant, est très complémentaire de la mise en place de l'annexe verte au bail et de contrats énergétiques performanciers.**

## ONZE RECOMMANDATIONS

<sup>25</sup> International Performance Measurement and Verification Protocol.

<sup>26</sup> En simplifiant, le Facilities Manager est chargé du service quotidien et de la gestion des fluides, le Property Manager est chargé de la gestion patrimoniale (baux, impôts, grosses réparations...), l'Asset Manager est chargé de la gestion de l'immobilier en tant qu'actif financier.

Sur la base de notre analyse, nous formulons onze recommandations, qui s'adressent aux professionnels de la construction et de l'immobilier et aux certificateurs. Ces recommandations concernent particulièrement le segment des bureaux.

**1/ Mettre en place un dispositif d'observation des consommations réelles des immeubles, avec définition des conditions d'utilisation.**

**2/ Conforter la notion de performance environnementale réelle des immeubles après exploitation et usage, en mettant en avant six indicateurs mesurables : énergie non renouvelable (KWh énergie primaire) , CO2 (Kg eq CO2) , eau (m<sup>3</sup>), déchets (Kg), qualité de l'air<sup>27</sup>, distance aux transports en commun en site propre (mètres). Nommer dans l'immeuble, ou le groupe d'immeubles, un(e) responsable de la performance environnementale réelle.**

**3/ Diffuser massivement la certification « HQE<sup>®</sup> Exploitation » et l'étendre à tous les segments immobiliers<sup>28</sup>.**

**4/ Mettre en priorité dans la conception des immeubles la qualité d'usage, le confort et le bien-être des occupants. Mettre particulièrement en avant la température, la ventilation, la lumière, l'acoustique et la qualité de l'air. S'assurer que l'occupant puisse maîtriser individuellement son environnement immédiat. Quand il est connu, associer le futur utilisateur à la conception de l'immeuble.**

**5/ Intégrer dans la conception la future exploitation maintenance de l'immeuble. Assurer un équilibre entre efficacité environnementale, robustesse, coût et facilité de maintenance, sans rechercher la plus forte efficacité théorique. Intégrer un exploitant dans l'équipe de maîtrise d'œuvre.**

**6/ Assurer la qualité environnementale intrinsèque de l'immeuble en allant jusqu'à une garantie de performance conventionnelle, attestée par une tierce partie et confortée par un assureur.**

---

<sup>27</sup> Le référentiel de la certification « HQE<sup>®</sup> Exploitation » propose le suivi, pour les polluants physico-chimiques, de tout ou partie des polluants suivants : CO, CO2, micro-particules, composés organiques volatils, formaldéhydes.

<sup>28</sup> Nous avons réalisé en 2010 une étude exploratoire pour CERQUAL sur un projet de certification logement de type « Habitat et Environnement Exploitation ». CERQUAL a lancé mi 2010 la réalisation du référentiel.

**7/ Articuler la certification « HQE® Exploitation » avec l'annexe environnementale au bail prévue à l'article 8 de la loi n°2010-788 dite Grenelle 2 du 12 juillet 2010, cette annexe pouvant fixer des objectifs d'amélioration des performances.**

**8/ Articuler certification « HQE® Exploitation » et contrat énergétique performantiel de type Contrat de Performance Energétique ou autre formule avec performances.**

**9/ Mettre en place des accords tri-partites de performance environnementale entre propriétaire/gestionnaire, utilisateur et exploitant, avec fixation d'objectifs de performance.**

**10/ Intégrer tout au long de la chaîne d'acteurs des modes de rémunération des intervenants en fonction de la performance: monteur d'opération, équipe de maîtrise d'œuvre, entreprises, gestionnaire, exploitant, utilisateur. Mettre en place en priorité une rémunération selon la performance pour la maîtrise d'œuvre, le gestionnaire et l'exploitant.**

**11/ Intégrer la performance énergie-environnement-santé dans l'évaluation de la valeur des immeubles.**



## ANNEXE 1

### LES PERSONNES INTERVIEWEES

#### 1/ INVESTISSEURS

- **GENERALI FRANCE IMMOBILIER**
  - Philippe BRION, Directeur Général Délégué, Directeur de la Gestion
  - Laurent CREPIN, Directeur Technique et du Développement Durable.
- **ICADE**
  - Denis BURCKEL, Directeur Audit, Risques et Développement Durable
  - Alain GUISNEL, Responsable Mission Développement Durable.

#### 2/ UTILISATEURS

- **PHILIPS**
  - Joël MARIAS, Directeur Immobilier et Services Généraux
- **SCHNEIDER ELECTRIC**
  - Pascal PELLERIN, Directeur Performance Energétique Schneider Electric France
  - Patrick ZIELINSKI, Directeur d'Etablissement & des Sites de Paris, Direction Territoire France.

#### 3/ EXPLOITANTS

- **DALKIA**
  - Jean-Philippe BUISSON, Directeur du Marché Tertiaire Ile de France
  - Pierre de MONTLIVault, Directeur des Nouvelles Offres Energétiques.
- **VINCI FACILITIES**
  - Julio DE ALMEIDA, Directeur Général FACEO France
  - David ERNEST, Directeur Expertises, Méthodes, Innovation.

## **ANNEXE 2**

### **LES ENSEIGNEMENTS DE LA RECHERCHE D'ORLANDO CATARINA (CSTB) ET SEBASTIEN ILLOUZ (ICADE)**

#### **« RETOUR D'EXPERIENCE DE BATIMENTS DE BUREAUX CERTIFIES HQE® : DYNAMISER L'EFFICACITE ENERGETIQUE DES GESTIONNAIRES DE PATRIMOINE DU SECTEUR PRIVE ». PREBAT-ADEME. 2009**

##### **« A/ Qualité énergétique de l'ouvrage**

##### **Les écarts à la hausse entre les intentions du projet et la réalité des performances en exploitation**

Les performances plus modestes qu'attendues traduisent la difficulté à bien appréhender l'usage et l'exploitation en conception. L'impact des comportements est effet d'autant plus important sur les consommations d'énergie que les bâtiments sont conçus pour être performants. Les préoccupations des maîtres d'ouvrage s'arrêtent pourtant encore à la livraison du bâtiment.

Les comportements ne sont malgré tout pas les seuls facteurs d'écart entre la performance conventionnelle et la performance effective. La qualité intrinsèque de l'ouvrage n'atteint pas non plus les niveaux attendus en projet. Quand les installations souffrent de surcroît d'un manque de fiabilité, les dépassements sont conséquents.

##### **L'efficacité énergétique passe par la qualité d'usage**

Le constat que l'efficacité énergétique passe aussi par une responsabilisation des utilisateurs n'est pas nouveau. L'étude a par contre clairement montré qu'il ne peut y avoir d'adhésion des occupants sans qualité d'usage, même si les utilisateurs sont de plus en plus sensibles à l'environnement. On ne peut en effet être plus exigeant avec les occupants que si le bâtiment est lui-même perçu de façon positive.

Il est par ailleurs illusoire d'espérer avoir une influence sur les comportements si le bâtiment ne garantit pas un niveau de fiabilité suffisant. On peut jouer la carte de la technologie pour gagner de l'efficacité énergétique, mais on s'expose à une contre-réaction si les équipements se révèlent fragiles ou coûteux à maintenir. La mobilisation des utilisateurs dans l'efficacité énergétique passe donc par un bâtiment offrant fiabilité et qualité d'usage.

##### **Garantie de performance ou garantie de résultats**

La garantie de performance relève de l'obligation de moyens alors que l'ampleur des enjeux du réchauffement climatique exige une garantie de résultats : réduction dans les consommations d'énergie, maîtrise des dépenses de maintenance, amélioration de la qualité d'usage, prise en compte des comportements.

## **B/ Les métiers**

### **La dilution des responsabilités d'efficacité énergétique**

Les responsabilités d'efficacité énergétique sont diluées dans le temps et éclatées entre différents intervenants. Cette rupture dans la chaîne de responsabilité aboutit à des bâtiments dont la performance énergétique et la fiabilité sont fragiles. Le gestionnaire hérite alors d'un ouvrage perfectible, mais ne se sent pas responsabilisé dans l'analyse des gisements et dans le pilotage des actions correctives et des améliorations.

La plus efficace des mesures serait la création d'un point de contact unique dans la responsabilité énergétique en projet et en fonctionnement.

### **La contribution du gestionnaire et de l'utilisateur à la performance**

Tout projet de construction très performant passe par des réflexions préalables pour gérer les singularités, par opposition à la répétition systématique de démarches ou de solutions types. Le questionnement sur la fiabilité des solutions préconisées à l'aune des usages attendus doit aussi être intégré dans cette réflexion. La performance doit également s'apprécier en tenant compte de l'utilisation de l'espace liée aux pratiques professionnelles et sociales de chaque entreprise.

De nombreuses études ont déjà souligné que la conception des bâtiments à haute efficacité énergétique représente une rupture dans la conduite de projet. Par contre peu ont mis l'accent sur l'importance du gestionnaire, d'une bonne information et d'un accompagnement des utilisateurs.

### **Evolution du profil du gestionnaire**

La pérennité des performances passe aussi par une meilleure prise en compte de l'exploitation-maintenance dans la conception. La maîtrise d'ouvrage éprouve souvent des difficultés à accéder à la connaissance de ces questions. La solution de facilité passe souvent par l'association au projet du futur gestionnaire, souvent connu tardivement et dont le rôle s'en trouve marginalisé. Il faut cependant reconnaître que les professionnels de la maintenance sont encore mal préparés pour pouvoir réaliser des prescriptions de maintenance au stade du programme ou de l'esquisse. Consultés en amont ils seraient peut-être bien embarrassés pour donner leur avis.

### **Le changement nécessaire des modes d'intervention du gestionnaire**

On ne peut dissocier performance énergétique effective et qualité de service tant le comportement de l'utilisateur est un élément clé dans la performance réalisée. Pour fonder la proximité entre le gestionnaire et les occupants, les professionnels de l'immobilier doivent passer de la qualité technique à la satisfaction des attentes des occupants. Il n'est cependant pas facile d'évoluer d'une dimension purement technique à une culture plus orientée service. La fiche de poste du gestionnaire est donc à revisiter pour prendre en compte ce changement dans les modes d'intervention de la maintenance.

## **C/ Gouvernance**

### **La nécessité d'un partenariat énergétique entre propriétaire, gestionnaire et utilisateur**

La convergence d'intérêts entre propriétaire, gestionnaire et utilisateur n'est pas toujours naturelle. Il convient donc de l'organiser par un partenariat définissant clairement les responsabilités et explicitant les interfaces entre les parties prenantes. Quand l'immeuble est en location, la notion de garantie des consommations ou des charges de maintenance, de qualité de confort est au cœur de ce type de dispositif, qualifié de bail vert. La difficulté est alors de définir les indicateurs et les outils d'analyse pertinents.

### **L'émergence de la valeur verte**

Les bâtiments à haute efficacité énergétique permettent de véhiculer des valeurs positives qui donnent sens et facilitent l'appropriation collective. Quelques études, notamment anglo saxonnes, commencent à explorer et à évaluer les bénéfices indirects des bâtiments à haute performance énergétique et leur impact sur la valeur patrimoniale : effet sur la productivité ou la concentration des occupants, impact sur l'attractivité et sur le rendement locatif.

## **D/ Les outils**

### **Le coût global : militant mais non pratiquant**

Malgré l'intérêt des professionnels et les discours, les approches en coût global restent approximatives. Plus rares encore sont les documents présentant des cas détaillés ou affichant des données de coûts différés ou de durées de vie. Nul doute qu'une information mieux partagée permettrait d'en accélérer le déploiement.

### **La documentation d'aide à l'exploitation**

La documentation livrée à la réception n'est guère adaptée à la prise en main des installations. Le cloisonnement des fonctions transforme souvent ce livrable en sous-produit de la conception inutilisé et inutilisable par le gestionnaire.

### **La prise en compte de l'exploitation-maintenance en conception**

Actuellement, la prise en compte de l'exploitation-maintenance (PCEM) en conception se traduit par la diffusion des plans à un spécialiste qui ne dispose que de quelques heures pour émettre ses commentaires sur un projet déjà quasiment achevé.

Il faut reconnaître que la connaissance permettant de mieux anticiper les consommations réelles d'énergie et les dépenses de maintenance sont encore très partielles. La PCEM passe par un recours à une assistance à maîtrise d'ouvrage spécialisé dans l'exploitation dès la phase de conception et au delà. Pour cela, le budget prévisionnel des études doit donc lui offrir une vraie place. »

## ANNEXE 3

### LISTE ET CARACTERISTIQUES DES OPERATIONS DE BUREAUX CERTIFIEES « HQE® EXPLOITATION » AU 23 FEVRIER 2011.

Source : CERTIVEA

Les tableaux qui suivent précisent le porteur de la certification, l'opération, la nature de la certification « HQE® Exploitation » : Engagement de l'exploitation, Exploitation, Exploitation et Utilisation, le numéro et la date de décision de certification, le niveau de performance par cible environnementale. Pour les certifications Exploitation et Utilisation, les deux tableaux en fin d'annexe précisent l'utilisateur attesté et le niveau de performance de son attestation.

## Certificats NF Bâtiments Tertiaires en Exploitation - Démarche HQE® - Mise à jour du 23/02/2011

Porteur	Opération	Phase de Certification	Numéro de décision	Date de décision	Profil environnemental QEBE													
					Admission	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
PROTERTIA FM 20, place de la Défense 92050 PARIS LA DEFENSE	TOUR EDF  20, place de la Défense 92050 PARIS LA DEFENSE	Exploitation	NF428/09/001	02/12/2009	TP	B	TP	TP	TP	TP	TP	TP	B	TP	P	TP	TP	TP
ICADE PÔLE FONCIERE TERTIAIRE Millénaire 1 - 35, rue de la Gare 75019 PARIS	BATIMENT 270  45, avenue Victor HUGO - Aubervilliers 93534 LA PLAINE SAINT-DENIS CEDEX	Exploitation	NF428/09/002	02/12/2009	TP	B	TP	B	P	TP	TP	TP	TP	TP	P	P	P	P
32 Hoche GIE 32, avenue Hoche 75008 PARIS	32 HOCHÉ  32, avenue Hoche 75008 PARIS BATIMENT VERDI	Exploitation et utilisation	NF428/09/003	02/12/2009	TP	B	P	P	P	TP	TP	TP	B	TP	TP	TP	TP	P
PHILIPS FRANCE 33, rue de Verdun BP 313 92156 SURESNES	33, rue de Verdun BP 313 92156 SURESNES	Exploitation et utilisation	NF428/09/004 rév01	21/01/2011	TP	TP	B	P	TP	TP	TP	B	B	TP	TP	P	TP	TP
SAS HEART OF LA DEFENSE 110, Esplanade Général de Gaulle 92931 LA DEFENSE	CŒUR DEFENSE  110, Esplanade Général de Gaulle 92931 LA DEFENSE	Exploitation	NF428/09/005	02/12/2009	TP	B	B	TP	B	TP	TP	TP	B	TP	TP	P	TP	TP
BOUYGUES TELECOM ZAC de l'échangeur, îlot 3, allée Pathé 18940 BOURGES	BOUYGUES TELECOM PRINTANIA  ZAC de l'échangeur, îlot 3, allée Pathé 18940 BOURGES	Exploitation et utilisation	NF428/09/006	02/12/2009	TP	B	B	B	P	TP	TP	TP	B	TP	P	P	P	P
OPTEOR IDF Tertiaire SAS 29, rue des Hautes Pâtures 92737 NANTERRE	MACIF  17/21, Place Etienne Pernet 75015 PARIS	Exploitation	NF428/09/007	02/12/2009	TP	B	TP	P	P	B	TP	B	B	TP	P	TP	TP	TP
GENERALI IMMOBILIER GESTION 7-9, boulevard Haussmann 75009 PARIS	TERRA NOVA 3  29-31, rue de Cuvier 93100 MONTREUIL	Exploitation	NF428/09/008	02/12/2009	B	B	TP	P	TP	P	TP	TP	B	TP	P	P	B	TP
SCI TOWER 21, boulevard de la Madeleine 75001 PARIS	Quai 33  33, quai de Dion Bouton 92800 PUTEAUX	Engagement de l'Exploitation	NF428/10/009	08/04/2010	TP	P	TP	P	TP	P	TP	TP	B	TP	P	P	B	TP
GECINA  16, rue des Capucnes 75002 PARIS	PORTES DE LA DEFENSE  15-55, boulevard Charles de Gaulle 92700 COLOMBES	Exploitation	NF428/10/010 Rev00	10/09/2010	P	B	TP	B	P	TP	TP	TP	B	TP	P	P	P	P

**Certificats NF Bâtiments Tertiaires en Exploitation - Démarche HQE® - Mise à jour du 23/02/2011**

Porteur	Opération	Phase de Certification	Numéro de décision	Date de décision	Profil environnemental QEBE													
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
DANONE	EUROCRYSTAL			Admission	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
150 Boulevard Victor HUGO 93400 SAINT QUIEN	150 Boulevard Victor HUGO 93400 SAINT QUIEN	Exploitation et utilisation	NF428/10/011 Rev00	10/09/2010	TP	B	P	TP	B	TP	TP	TP	B	TP	P	P	P	P
ALLIANZ REAL ESTATE France SNC	TOUR OLIVIER DE SERRES	Engagement de l'Exploitation	NF428/10/012 Rev00	10/09/2010	P	B	TP	TP	TP	TP	TP	TP	B	TP	P	B	TP	P
HERVE THERMIQUE 47, rue Ampère 95303 CERGY PONTOISE	Agence Paris Ile de France Installation 47, rue Ampère 95303 CERGY PONTOISE	Exploitation et utilisation	NF428/10/013 Re00	10/09/2010	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	P	TP	TP	TP	TP	TP
LOCAPARIS 151, rue Saint-Honoré 75001 PARIS	103, rue de Grenelle 75007 PARIS	Engagement de l'Exploitation	NF428/10/014 Rev00	23/09/2010	TP	B	P	P	P	P	TP	TP	B	P	P	P	B	P
IVG FRONT OFFICE ASNIERES	FRONT OFFICE 14, rue Sarah Bernhardt 92600 ASNIERES SUR SEINE	Engagement de l'Exploitation	NF428/10/015 Rev00	30/09/2010	TP	B	TP	P	P	TP	TP	TP	B	P	P	B	TP	TP
CEREP AULAGNIER 75, Boulevard Hausmann 75008 PARIS SCI BRP1	2 à 8 rue Sarah Bernhardt 92600 ASNIERES SUR SEINE RIVER OUEST	Engagement de l'Exploitation	NF428/10/016 Rev00	23/09/2010	TP	B	B	P	B	P	TP	TP	B	B	TP	P	P	P
30, rue de Berri 75008 PARIS	80, Quai Voltaire 95876 BEZONS LE HIVE	Engagement de l'Exploitation	NF428/10/017 Rév01	15/10/2010	TP	TP	TP	P	TP	TP	TP	TP	B	TP	TP	TP	TP	P
SCHNEIDER ELECTRIC 35, rue Joseph Monier 92500 RUEIL MALMAISON	35, rue Joseph Monier 92500 RUEIL MALMAISON	Exploitation et utilisation	NF428/10/018 Rev00	23/09/2010	TP	B	P	TP	P	P	TP	TP	B	P	TP	P	P	P
Bristol-Myers Squibb 3, rue Joseph Monier 92500 RUEIL MALMAISON	Le CRISTALIA 3, rue Joseph Monier 92500 RUEIL MALMAISON	Exploitation	NF428/10/019 Rev00	28/10/2010	TP	TP	TP	P	TP	P	TP	TP	B	TP	TP	TP	TP	TP
AXA France SUPPORTS T3 – 2ème Arche 313 Terrasses de l'Arche 92727 NANTERRE CEDEX	AXA France 1, Place Victorien Sardou 78160 MARLY LE ROY	Exploitation et utilisation	NF428/10/020 Rev00	07/12/2010	TP	B	P	B	TP	B	B	TP	B	P	TP	P	TP	TP
SOCIETE GENERALE Direction de L'Immobilier du Groupe Espace 21-7 – 30 Place Ronde – Quartier Valmy 75886 PARIS LA DEFENSE Cedex 18	TOUR GRANITE Parvis Granite – 104, Passage Valmy 75886 Paris Cedex 18	Exploitation et utilisation	NF428/10/021 Rev00.	16/12/2010	TP	B	TP	TP	P	TP	TP	TP	B	TP	TP	P	TP	TP
PT MONDIAL SCI 8, rue de l'Hôtel de Ville 92200 NEUILLY SUR SEINE	LE MONDIAL 15/21, avenue Jules Rimet 93200 SAINT DENIS	Exploitation	NF428/10/022 Rev00.	16/12/2010	TP	P	TP	P	P	P	P	B	B	P	B	P	P	TP

## Certificats NF Bâtiments Tertiaires en Exploitation - Démarche HQE® - Mise à jour du 23/02/2011

Porteur	Opération	Phase de Certification	Numéro de décision	Date de décision	Profil environnemental QEBE														
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
				Admission															
LE DELAGE S.A 41, avenue de la Liberté L-1931 LUXEMBOURG	LE DELAGE 6, Henri Barbusse 92230 GENNEVILLIERS	Exploitation	NF428/10/023 Rev00	20/01/2011	TP	B	TP	B	B	TP	TP	TP	B	P	P	P	B	B	
SU3 SAS 4, rue Marivaux 75002 PARIS	LE BLERIOT 1/3, Quai Marcel Dassault 92150 SURESNES	Exploitation	NF428/10/024 Rev00	20/01/2011	TP	P	TP	TP	P	B	TP	B	B	P	P	P	B	P	
CEREP FRANKLIN SARL Tour Maine Montparnasse 33, avenue du Maine 75755 PARIS CEDEX 15	TOUR 9 3, rue Franklin 93100 MONTREUIL	Engagement de l'Exploitation	NF428/11/025 Rev00	20/01/2011	TP	P	TP	P	P	P	P	B	B	TP	P	P	P	TP	
McDonald's France Services 1, rue Gustave Eiffel 78049 GUYANCOURT	Restaurant McDonald's Plaisance du Touch 32, route de Toulouse 31830 PLAISANCE DU TOUCH	Exploitation	NF428/10/026 Rev00	28/01/2011	B	B	TP	P	P	TP	B	B	B	TP	P	P	B	B	
SDC CB20 Les Miroirs (Copropriétaires Compagnie de Saint-Gobain, Société Foncière Lyonnaise, Opéra Rendement (BNP Paribas REIM), représentés par leur Syndic Icade Property Management) 18, Avenue d'Alsace 92096 LA DEFENSE CEDEX	CB20 LES MIROIRS 18, avenue d'Alsace 92400 COURBEVOIE	Exploitation	NF428/10/027 Rev00	28/01/2011	B	B	P	P	B	B	TP	B	B	TP	P	B	P	TP	
ICADE PÔLE FONCIERE TERTIAIRE Millénaire 1 35, rue de la Gare 75168 PARIS CEDEX 19	MILLENAIRE 1	Exploitation et utilisation	NF428/10/028 Rev00	04/02/2011	TP	B	B	B	P	TP	TP	B	B	TP	P	P	P	B	



**Attestations de la Qualité Environnementale d'Utilisation  
Certification NF Bâtiments Tertiaires en Exploitation - Démarche HQE®  
Mise à jour du 23/02/2011**



utilisateur attesté	N°Attestation utilisateur	Opération	Phase de Certification	Rattaché au certificat NF Batiment Tertiaires en Exploitation N°	Date de décision	niveau d'attestation
<b>BOUYGUES SA</b> 32, avenue Hoche 75008 PARIS	2009/001	<b>32 HOCHÉ</b> 32, avenue Hoche 75008 PARIS	Exploitation et utilisation	NF428/09/003	02/12/2009	TP
<b>PHILIPS FRANCE</b> 33, rue de Verdun BP 313 92156 SURESNES	2009/002	<b>BATIMENT VERDI</b> 33, rue de Verdun BP 313 92156 SURESNES	Exploitation et utilisation	NF428/09/004 Rev01	20/01/2011	TP
<b>BOUYGUES TELECOM</b> ZAC de l'échangeur ilôt 3 - allée Pathé 18940 BOURGES	2009/003	<b>BOUYGUES TELECOM PRINTANIA</b> ZAC de l'échangeur - ilôt 3 - allée Pathé 18940 BOURGES	Exploitation et utilisation	NF428/09/006	02/12/2009	TP
<b>DANONE</b> 152 Boulevard Victor HUGO 93400 SAINT OUEN	2010/004	<b>EUROCRYSTAL</b> 152 Boulevard Victor HUGO 93400 SAINT OUEN	Exploitation et utilisation	NF428/10/011 Rev00	10/09/2010	P

**Attestations de la Qualité Environnementale d'Utilisation**  
**Certification NF Bâtiments Tertiaires en Exploitation - Démarche HQE®**  
**Mise à jour du 23/02/2011**



utilisateur attesté	N°Attestation utilisateur	Opération	Phase de Certification	Rattaché au certificat NF Batiment Tertiaires en Exploitation N°	Date de décision	niveau d'attestation
<b>HERVE THERMIQUE</b> 47, rue Ampère 95303 CERGY PONTOISE	2010/005	<b>Agence Paris Ile de France installation</b> 47, rue Ampère 95303 CERGY PONTOISE	Exploitation et utilisation	NF428/10/013 Rev00	10/09/2010	<b>TP</b>
<b>SCHNEIDER ELECTRIC</b> 35, rue Joseph Monier 92500 RUEIL MALMAISON	2010/006	<b>LE HIVE</b> 35, rue Joseph Monier 92500 RUEIL MALMAISON	Exploitation et utilisation	NF428/10/018 Rev00	23/09/2010	<b>P</b>
<b>AXA FRANCE SUPPORTS</b> T3 - 2ème Arche 313 Terrasses de l'Arche 92727 NANTERRE CEDEX	2010/007	<b>AXA FRANCE</b> 1, Place Victorien Sardou 78160 MARLY LE ROY	Exploitation et utilisation	NF428/10/020 Rev00	07/12/2010	<b>P</b>
<b>SOCIETE GENERALE</b> Direction de l'Immobilier du Groupe Espace 21-7 - 30 Place Ronde - Quartier Valmy 75886 PARIS LA DEFENSE Cedex 18	2010/008	<b>TOUR GRANITE</b> Parvis Granite - 104, Passage Valmy 75886 Paris Cedex 18	Exploitation et utilisation	NF428/10/021 Rev00	16/12/2010	<b>P</b>
<b>ICADE</b> Millénaire 1 35, rue de la Gare 75168 PARIS CEDEX 19	2011/009	<b>Millénaire 1</b> 35, rue de la Gare 75019 PARIS	Exploitation et utilisation	NF428/10/027 Rev00	04/02/2011	<b>P</b>

<http://tinyurl.com/334f2z9>

## ANNEXE 4

### RÉFÉRENCES

Bouteloup G., Bullier A., Carassus J., Ernest D., Pancrazio L., Sanchez T. *"Evaluer et garantir la valeur verte immobilière"*. IEIF Réflexions Immobilières n°53. 3ème trimestre 2010.

Brunel M., « *Rapport du groupe de travail Valeur Verte* », Plan Bâtiment Grenelle, Septembre 2010.

Catarina O. et Illouz S. « *Retour d'expérience de bâtiments certifiés HQE: Dynamiser l'efficacité énergétique des gestionnaires de patrimoine du secteur privé* ». PREBAT-ADEME-ICADE-CSTB. Décembre 2009.

Eichholtz Piet, Kok Nils, Quigley John M., *"Doing Well by Doing Good? An Analysis of the Financial Performance of the Green Office Buildings in the USA"*. Mars 2009 (Universités de Maastricht et de Californie).

Eichholtz Piet, Kok Nils, Quigley John M., *"The Economics of Green Building"*. Septembre 2010 (Universités de Maastricht et de Californie).

Fuerst Franz, McAllister Patrick, *"New Evidence on the Green Building Rent and Price Premium"*. Avril 2009 Henley Business School (Université de Reading).

Havard, M. « *Rapport sur l'obligation d'élaboration d'un bilan d'émissions des gaz à effet de serre prévue par l'article 26 du Projet de loi portant Engagement National pour l'Environnement* ». Documentation Française. Décembre 2009.

Miller Norm, Spivey Jay, Florance Andy, *"Does Green PayOff?"* 2008 (Université de San Diego, base de données CoStar).

Newsham, G.R.; Mancini, S.; Birt, B. « *Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but...* » Institut de Recherche en Construction du Canada. Août 2009.

Pyvo Gary, Fisher Jeffrey D. *"Investment returns from Responsible Property Investments: Energy Efficient, Transit-oriented and Urban Regeneration Office Properties in the US from 1998-2008"*. Mars 2009.

Zraggen JM., Barthassat M., Haefeli P., Lachal B., Schmid B., Weber W.. « *Case study of a low-energy (Minergie®) multifamily complex in Switzerland. First appraisal after two years of exploitation* ». PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.

**Tous ces textes sont en libre accès sur le Blog dédié à l'Immobilier Durable (Politiques et Marchés, Coûts et Rentabilité, Finance) : [www.immobilierdurable.eu](http://www.immobilierdurable.eu)**