



Smart-Réno

Fiabiliser, Professionnaliser, Valoriser la Rénovation Énergétique

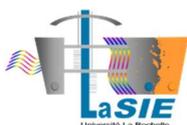
Troisième volet : Valoriser le confort

Livrable T3.3 – Définition des indicateurs de confort

Auteurs : Charles-Florian Picard, Marc Abadie, Adrien Dhalluin

Contributeurs : Karim Limam, Bénédicte Wall-Ribot, Philippe Petiot, Jérôme Nicolle, Katia Cordeiro Mendonça, Florian Battezzati, Jérôme Le Dréau, Denis Covalet

Mars 2020



Sommaire

1	Introduction.....	6
1.1	Objectifs du livrable.....	6
1.2	Définition de la QEI.....	6
2	Confort thermique et hygrothermique	7
2.1	Une définition subjective	7
2.2	Approches et modèles.....	8
2.2.1	Modèle de Fanger, (PMV-PPD et norme ISO 7730)	8
2.2.2	Approche thermo physiologique (Gagge, Zhang...)	10
2.2.2.1	Modèle de Gagge	11
2.2.2.2	Autres modèles et exemple de l'approche de Zhang (2010)	12
2.2.3	Inconforts locaux.....	12
2.2.4	Approche adaptative	14
2.2.5	Cas des logements.....	16
2.3	Indices de confort thermique et hygrothermique	17
2.3.1	Température opérative	18
2.3.1.1	Définition	18
2.3.1.2	Applications réglementaires.....	18
2.3.1.2.1	Tic (température intérieure conventionnelle)	18
2.3.1.2.2	DH (Degré heure d'inconfort).....	18
2.3.1.2.3	DIES (Durée d'Inconfort d'Eté Statistique).....	18
2.3.2	ET*	19
2.3.3	SET	19
2.3.4	IADI	20
2.4	Synthèse	20
3	Confort acoustique.....	22
3.1	Définition du niveau de pression acoustique.....	22
3.2	Acoustique du bâtiment.....	24
3.2.1	Textes de référence.....	24
3.2.1.1	Bruits aériens.....	25
3.2.1.2	Bruits de choc	26
3.2.1.3	Bruits d'équipement.....	26
3.2.2	Exigences minimales pour les logements.....	26
3.3	Indices de confort acoustique	28
3.3.1	L _{Aeq}	28

3.3.2	L _{max}	28
3.3.3	NR/ISO.....	28
3.3.4	Temps de réverbération.....	29
3.4	Synthèse.....	30
4	Confort visuel.....	31
4.1	Définitions.....	31
4.1.1	Les différentes grandeurs physiques utiles.....	31
4.1.2	Le confort visuel et la lumière naturelle.....	32
4.2	Textes et niveaux de référence.....	33
4.3	Indices de confort visuel.....	34
4.3.1	Facteur lumière du jour (FLJ).....	34
4.3.2	Autonomie d'éclairage naturel (AEN).....	35
4.3.3	Indice d'ouverture et de profondeur.....	36
4.3.4	Uniformité de l'éclairage.....	36
4.3.5	Indices d'éblouissement.....	37
4.3.6	Indice de rendu des couleurs.....	37
4.4	Synthèse.....	38
5	Qualité de l'Air Intérieur.....	40
5.1	Polluants de l'air intérieur.....	40
5.2	Zoom sur les polluants cibles dans les logements.....	41
5.2.1	Hiérarchisation et détermination des polluants cibles.....	41
5.2.2	Brève description des polluants cibles.....	43
5.2.2.1	Polluants organiques volatils et semi-volatils.....	43
5.2.2.2	Polluants inorganiques.....	44
5.2.2.3	Polluants particulaires et biologiques.....	44
5.2.2.4	Valeurs guides et limites d'exposition.....	45
5.3	Indices de Qualité de l'Air Intérieur.....	47
5.3.1	LHVP.....	47
5.3.2	CLIM 2000.....	47
5.3.3	BILGA.....	48
5.3.4	GAPI.....	49
5.3.5	IAPI.....	49
5.3.6	QUAD-BBC.....	51
5.3.7	EVCI/DALE/DALY.....	52
5.3.7.1	Approche « IND ».....	53
1.1.1.1.1	Approche « ID ».....	54

5.3.8	IQAI	54
5.3.9	Indice et critère du Club Ventilation animé par le CEREMA.....	55
5.3.9.1	Critère sur le CO ₂	55
5.3.9.2	Critère sur l’humidité relative	56
5.3.10	ICONE.....	57
5.3.11	ULR-QAI	57
5.4	Synthèse	58
6	Environnement électromagnétique	61
6.1	Définitions et sources.....	61
6.2	Les effets sur la santé.....	62
6.2.1	Effets à court termes	62
6.2.2	Effets à long termes.....	63
6.3	Les textes de référence	64
6.3.1	Décret n°2002-775	64
6.3.2	Code du travail	65
6.4	Indices de l’environnement électromagnétique.....	66
6.4.1	Indices ICNIRP	66
6.4.2	Indice INRIA	67
6.5	Synthèse	67
7	Indices multicritères.....	69
7.1	Indice de la norme NF EN 15251	69
7.1.1	Evaluation détaillé.....	69
7.1.2	Evaluation globale	70
7.2	Indice « Aéroport de Paris »	70
7.3	Indice IEI – Chiang et Lai (2002)	71
7.4	Indice IEI – Moschandreas et Sofuoglu (2004)	72
7.5	Indice TAIL – Wargocki et al. (2019).....	73
7.6	Annexe 68.....	74
8	Conclusion	76
9	Références :.....	78

1 Introduction



1.1 Objectifs du livrable

La notion de confort dans les bâtiments est pluridisciplinaire et repose à la fois sur des notions thermiques, hygrothermiques, acoustiques, visuelles, de qualité d'air intérieur et d'environnement électromagnétique. Le caractère subjectif et irrationnel de la perception du confort par les occupants rend cependant cette notion difficile à appréhender.

Ce rapport vise à fournir, dans un premier temps, une étude bibliographique sur les différentes catégories de confort et de qualité de l'environnement intérieur ainsi que sur les indicateurs permettant de les caractériser. Dans un second temps, une sélection d'indicateurs, calculables et mesurables dans le cadre du projet Smart-Réno, est discutée afin de permettre de juger des gains de confort de différents actes de rénovations.

1.2 Définition de la QEI

Le bien-être des individus dépend essentiellement de leur santé, de leur confort et des conditions de sécurité dans lesquelles ils peuvent exercer leur activité. Il est communément admis qu'une bonne qualité environnementale intérieure (QEI) nécessite la coexistence de quatre principaux aspects : un confort thermique, acoustique et visuel, ainsi qu'une bonne qualité de l'air intérieur. L'environnement électromagnétique peut également être considéré.

Son évaluation est complexe et fait intervenir une grande variété de variables, elles-mêmes influencées par des facteurs et paramètres relatifs au bâtiment, aux conditions extérieures et aux activités humaines (Figure 1). La détermination de recommandations pertinentes est d'autant plus difficile qu'il peut y avoir inadéquation entre l'évaluation d'un environnement et le ressenti des occupants (Bluyssen et al, 1995) du fait de la mauvaise connaissance des relations entre mesures et évaluation subjective des paramètres physiques et chimiques ou encore à l'absence de consensus sur certains indicateurs. D'autres paramètres physiologiques et psychologiques liés à l'individu tels que son âge, son état de forme physique et mental, sa satisfaction au travail, ses relations avec les autres occupants, etc. peuvent également influencer sur le bien-être et le confort des occupants, et ajoutent à cette complexité.

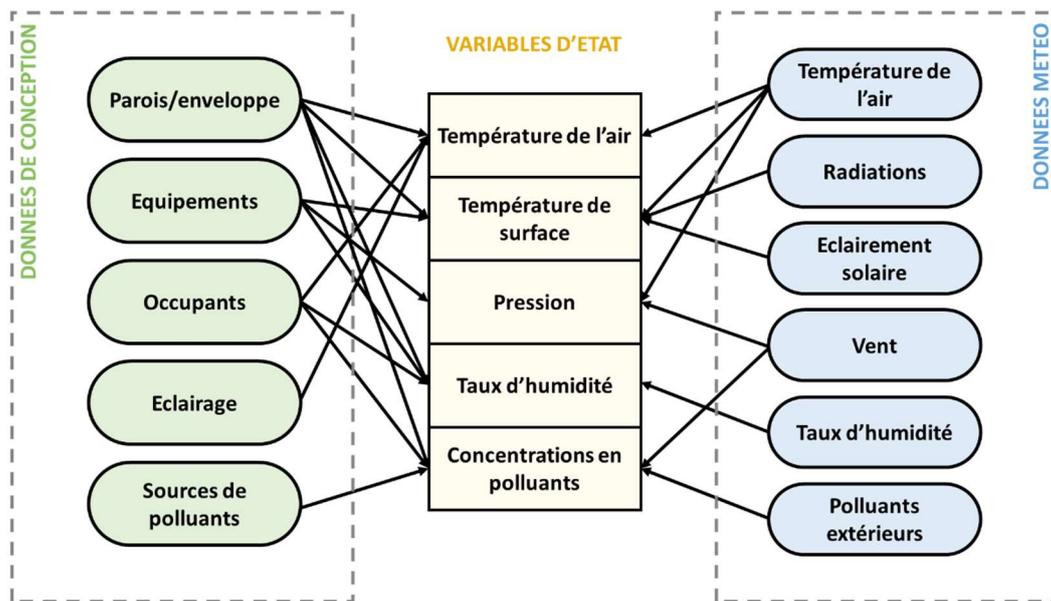


Figure 1 : Complexité des phénomènes pris en compte dans l'étude de la qualité des ambiances intérieures (d'après Allard, 2002)

2 Confort thermique et hygrothermique

2.1 Une définition subjective

L'homme est homéotherme et sa température n'est pas directement dépendante de la température extérieure mais est régie par différents mécanismes de thermorégulation, comportementales ou physiologiques. La chaleur produite par le métabolisme peut être compensée ou s'ajouter aux échanges par convection, conduction avec les surfaces, évaporation (sudation ou respiration) ou rayonnement. Une modélisation simple du bilan enthalpique du corps, équation (1), permet de calculer la charge thermique L (W.m^{-2}) en fonction des variables de l'ambiance (température d'air, de rayonnement, vitesse d'air et humidité) et celles de l'individu (métabolisme, habillement). Si celle-ci est nulle, l'individu est en situation d'équilibre thermique.

$$L = M - W - R - (C + C_{res}) - (E_{res} + E_{diff} + E_{sud}) \quad (1)$$

- Où :
- L est la charge thermique (W.m^{-2}) ;
 - M est la production d'énergie métabolique (W.m^{-2}) ;
 - W est le travail mécanique extérieur fourni par le corps (W.m^{-2}) ;
 - R est dû au rayonnement thermique (W.m^{-2}) ;
 - C est dû à la convection thermique (W.m^{-2}) ;
 - C_{res} est dû à la convection respiratoire (W.m^{-2}) ;
 - E_{res} est la perte de chaleur par évaporation respiratoire (W.m^{-2}) ;
 - E_{diff} est la perte de chaleur par évaporation par diffusion d'humidité à travers la peau (W.m^{-2}) ;
 - E_{sud} est la perte de chaleur par sudation et évaporation de la sueur (W.m^{-2}).

Fanger (1970) définit alors trois conditions pour qu'une personne soit en confort thermique :

- Le corps est à l'équilibre thermique (charge thermique L nulle) ;
- La sudation est dans les limites du confort ;
- La température moyenne de la peau est dans les limites du confort.

Une telle définition est donc essentiellement subjective. En prenant en compte une certaine plage de valeur pour les variables liées à l'individu et certaines variables de l'ambiance, il est par exemple possible de déterminer des plages de confort en fonction de la température et du taux d'humidité (Figure 2).

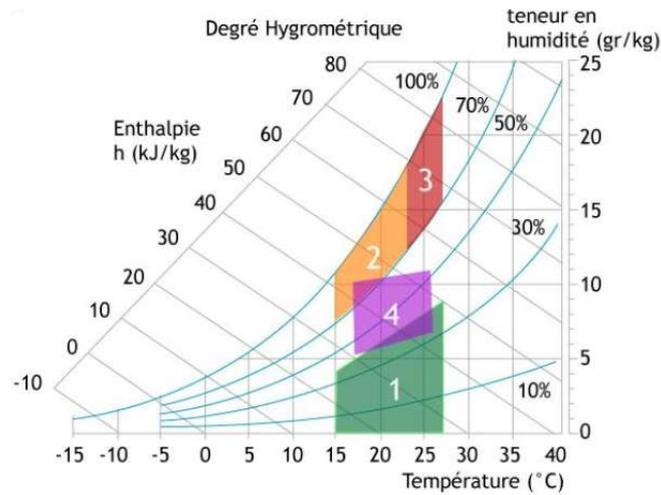


Figure 2 : Diagramme d'après Fauconnier (1992). Le polygone 4 représente la zone de confort hygrothermique. La zone 1 est à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse, la zone 2 et 3 sont à éviter vis-à-vis des développements de bactéries, de microchampignons et d'acariens (zone 3).

A partir des années 70 et les travaux de Fanger, plusieurs modèles ont vu le jour afin de tenter de prédire le confort hygrothermique des occupants.

2.2 Approches et modèles

2.2.1 Modèle de Fanger, (PMV-PPD et norme ISO 7730)

Au début des années 70, Fanger a établi une méthode permettant d'évaluer la sensation thermique des occupants à partir de leur bilan énergétique, en intégrant les paramètres physiques de l'environnement (températures d'air et des parois, vitesse d'air, humidité) et les caractéristiques propres au sujet étudié (activité, habillement).

Il s'agit donc d'un modèle empirique. Les relations suivantes ont été établies statistiquement à partir d'études expérimentales auprès de 1300 sujets en chambre climatique, en conditions homogènes et stationnaires.

En situation de confort, le bilan, équation (2) s'écrit alors (EN ISO 7730, 2007) :

$$L = (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} (5733 - 6,99 (M - W) - p_v) - 0,42 ((M - W) - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_v) - 0,0014 M (34 - T_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} ((T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4) - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \quad (2)$$

Où : T_a est la température de l'air (°C) ;
 T_r est la température de rayonnement (°C) ;
 p_v est la pression partielle en vapeur d'eau (Pa) ;

v_{air} est la vitesse relative de l'air ($m.s^{-1}$) ;

$M - W$ est la différence entre la production de chaleur métabolique M et le travail extérieur W ($W.m^{-2}$) ;

T_{cl} est la température de surface du vêtement ($^{\circ}C$) ($T_{cl} = 35,7 - 0,028(-0,4) (M - W) - I_{cl} \times \{3,96 \cdot 10^{-8} \times f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)\}$) ;

I_{cl} est l'isolement thermique du vêtement ($m^2.K.W^{-1}$) ;

f_{cl} est un facteur tel que $f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \times I_{cl} & \text{pour } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2.K.W^{-1} \\ 1,05 + 0,645 \times I_{cl} & \text{pour } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2.K.W^{-1} \end{cases}$

Afin de traduire concrètement cette notion, Fanger a établi un indice lié à cette charge thermique L , qui prévoit le vote moyen prévisible d'une population PMV (*Predicted Mean Vote*) de la sensation thermique, de manière globale. Les corrélations entre L et le PMV ont été déterminées statistiquement à partir d'études expérimentales sur un échantillon de 1400 personnes, amenées à s'exprimer sur l'appréciation de différents climats intérieurs dans des chambres climatiques :

$$PMV = [0,303.exp(-0,036.M) + 0,028].L$$

$$PMV = (0,303 e^{-0,036 M} + 0,028) \left((M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} (5733 - 6,99 (M - W) - p_v) - 0,42 ((M - W) - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_v) - 0,0014 M (34 - T_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} ((T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4) - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \right) \quad (3)$$

D'après la norme EN ISO 7730 (2006), l'indice PMV a été établi pour des valeurs stationnaires de ces différentes variables, mais il peut être déterminé avec une bonne approximation lorsqu'une ou plusieurs variables fluctuent faiblement, à condition de considérer leurs moyennes pondérées en fonction du temps pendant l'heure précédente. L'échelle du PMV comporte 7 degrés allant de -3 (très froid) à $+3$ (très chaud), comme indiqué sur le Tableau 1.

Tableau 1 : échelle de sensation thermique selon la valeur du PMV .

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Froid	Frais	Légèrement Frais	Neutre	Légèrement tiède	Tiède	Chaud

Toujours d'après cette norme, il est conseillé d'utiliser l'indice PMV uniquement pour les valeurs comprises entre -2 et $+2$, c'est-à-dire en-dehors des extrêmes de sensation thermique et lorsque les six principaux paramètres sont compris dans les intervalles suivantes :

- $M = 46$ à 232 W/m^2 (soit 0,8 met à 4 met)
- $I_{cl} = 0$ à $0,310 \text{ m}^2.^{\circ}C/W$ (soit 0 clo à 2 clo)
- $T_a = 10$ à $30 \text{ }^{\circ}C$
- $T_r = 10$ à $40 \text{ }^{\circ}C$
- $v_{air} = 0$ à 1 m/s
- $P_a = 0$ à 2700 Pa

Afin de lier à cette échelle de sensation thermique l'acceptabilité de l'ambiance thermique, Fanger a proposé un autre indice, le pourcentage des personnes qui seront insatisfaites dans l'ambiance considérée, le *PPD* (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) défini tel que :

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0,03353.PMV^4 + 0,2179.PMV^2)] \quad (4)$$

La Figure 3 présente l'évolution des valeurs du *PPD* en fonction de celles du *PMV*. On remarque que la totalité des personnes ne peut être satisfaite par l'ambiance. Un minimum de 5% des personnes resteront insatisfaites malgré un vote égal à zéro (sensation neutre). D'après la norme américaine (ASHRAE, 2004), les individus sont à priori en situation de confort si le *PPD* est inférieur à 10 % (soit le *PMV* entre -0,5 et +0,5), mais d'une manière générale la plage [-1,1] est considérée comme confortable.

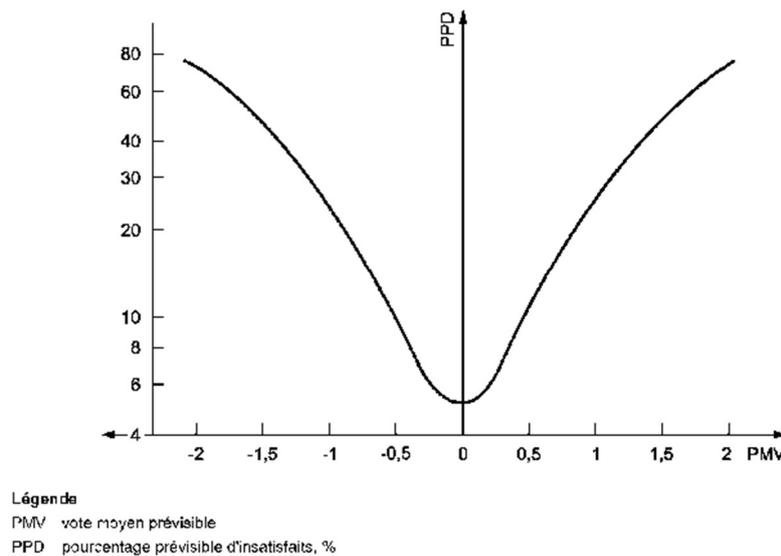


Figure 3 : PPD en fonction du PMV (EN ISO 7730, 2006)

La norme ISO 8996 (2004), *Ergonomie de l'environnement thermique – Détermination du métabolisme énergétique*, fournit différentes méthodes pour déterminer la production métabolique de chaleur suivant différentes activités et environnements de travail. Une unité adaptée est définie, le « Met » et correspond à 58,15 W.m⁻², soit environ la production de chaleur d'une personne sédentaire.

La norme ISO 9920 (2009), *Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire*, vise à fournir des méthodes d'estimation des caractéristiques thermiques en régime permanent pour des vêtements classiquement utilisés. Il s'agit notamment de la résistance transfert de chaleur à sec et par évaporation. Une unité, le « Clo » est introduite pour mesurer cet effet et représente 0,155 m².K.W⁻¹. Ainsi un costume classique à une résistance aux transferts de chaleur à sec d'environ 1 Clo.

2.2.2 Approche thermo physiologique (Gagge, Zhang...)

L'approche de Fanger considère les échanges, entre le corps et l'ambiance, de façon globale. Une autre approche consiste à diviser le corps en segments et ne le considère plus comme un bloc unique, afin de permettre la prise en compte de la dynamique des réponses physiologiques.

2.2.2.1 Modèle de Gagge

C'est le cas du modèle dynamique simplifié de la thermorégulation (ASHRAE, 1997), développé par Gagge (Gagge, 1986), qui étudie les échanges du corps humain entre deux nœuds concentriques représentant le centre du corps et la peau. Ces échanges se font sous forme de conduction tissulaire et de convection sanguine. Contrairement au modèle de Fanger, ce modèle permet de calculer les variables physiologiques (températures cutanées et internes, mouillure cutanée) dans des conditions transitoires pour des niveaux d'activité faibles et modérés dans des environnements frais et très chauds (Gagge et al., 1971).

Pour chacun des nœuds, les flux de chaleur d'échange peuvent s'écrire :

$$S_{int} = \frac{m_{int}c_{p,int}}{A_D} \frac{dT_{int}}{dt} = \frac{(1-\alpha)m_b c_{p,int}}{A_D} \frac{dT_{int}}{dt} \quad (5)$$

$$= M + M_{shiv} - (K + \rho_{sang} \dot{m}_{sg} c_{p,sg})(T_{int} - T_{peau}) - W - Q_{res}$$

$$S_{peau} = \frac{m_{peau}c_{p,peau}}{A_D} \frac{dT_{peau}}{dt} = \frac{\alpha m_b c_{p,peau}}{A_D} \frac{dT_{peau}}{dt} \quad (6)$$

$$= (K + \rho_{sang} \dot{m}_{sg} c_{p,sg})(T_{int} - T_{peau}) - Q_{dry} - Q_{evap}$$

Où : S_{int} , S_{peau} sont les flux de chaleur sortant respectivement de la zone intérieure et de la peau ($W.m^{-2}$) ;

A_D est la surface d'échange entre zones (m^2) ;

m_{int} , m_{peau} , m_{sg} sont les masses de la zone intérieure, de la peau et du sang (kg) ;

T_{int} , T_{peau} sont respectivement les températures de la zone intérieure et de la peau (K) ;

$c_{p,int}$, $c_{p,peau}$, $c_{p,sg}$ sont respectivement les chaleurs spécifique de la zone intérieure ($3500 J.kg^{-1}.K^{-1}$), de la peau ($3500 J.kg^{-1}.K^{-1}$) et du sang ($4190 J.kg^{-1}.K^{-1}$) ;

α est la fraction de masse corporelle concentrée sur la peau $\alpha = 0,0418 + \frac{0,7452}{\dot{m}_{sg} + 0,5854}$;

K est la transmittance cutanée ($5,28 W.m^{-2}.K^{-1}$) ;

ρ_{san} est la masse volumique du sang ($1,29 kg.L^{-1}$) ;

\dot{m}_{sg} est le débit sanguin périphérique (environ $6,3 L.m^{-2}.h^{-1}$) qui varie en fonction de la vasodilatation ($T_{int} > 36,8^\circ C$) ou la vasoconstriction ($T_{peau} < 33,6^\circ C$) :

$$\dot{m}_{sg} = \frac{6,3 + 200 \max(0; T_{int} - 36,8)}{1 + 0,5 \max(0; 33,6 - T_{peau})} ;$$

M_{shiv} est le flux de chaleur de refroidissement ($W.m^{-2}$) :

$$M_{shiv} = 19,4 \max(0; 33,6 - T_{peau}) \max(0; 36,8 - T_{int});$$

Q_{res} est le flux de chaleur dû à la respiration ($W.m^{-2}$) ;

Q_{dry} est le flux de chaleur sec ($W.m^{-2}$) ;

Q_{evap} est le flux de chaleur dû à l'évaporation ($W.m^{-2}$).

Malgré sa simplicité, ce modèle a montré de bons résultats dans la prédiction des transferts de chaleur entre le corps (zone interne + zone cutanée) et l'environnement ainsi qu'entre les deux zones corporelles. En sortie du modèle, la température cutanée et la mouillure cutanée sont utilisées pour le calcul d'un indice développé par Gagge : le SET (température effective standard). Cet indice représente la température équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans

laquelle un sujet portant une v ture standard échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même réponse physiologique que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve (cf. partie 2.3.).

Le modèle de Gagge permet également de mieux prendre en compte les effets de l'humidité en zone chaude, en remplaçant la température opérative par la température effective ET^* dans le calcul du PMV. Le nouveau PMV ainsi calculé se note PMV^* . Le PMV^* et le PMV se confondent en zones froide et neutre, ainsi qu'à 50% d'humidité relative (HR) en zone chaude.

2.2.2.2 Autres modèles et exemple de l'approche de Zhang (2010)

Le modèle de Gagge a pour principal avantage de proposer une implémentation simple, à 2 nœuds, permettant la prise en compte du fonctionnement physiologique des occupants. De nombreux modèles de thermorégulation humaine existe cependant. Dès le début des années 70, Stolwijk propose par exemple un modèle à 25 nœuds dans le cadre de la recherche aérospatiale.

Un autre exemple d'approche est proposé par Zhang et al. (2010a, b, c) et permet de traiter le confort hygrothermique également en environnement transitoire et/ou non uniforme, contrairement à l'approche classique de Fanger qui se contente des environnements stationnaires. Il permet de prédire les sensations locales des différentes parties du corps (Zhang et al., 2010a, b) et la sensation globale (Zhang et al., 2010c).

Contrairement au modèle de Gagge, le corps est subdivisé en quinzaine de nœuds. Une telle discrétisation permet notamment de prendre en compte la théorie de l'alliesthésie appliquée au confort thermique. En effet un stimulus, capable d'améliorer l'état du milieu interne, va être perçu comme agréable et la sensation n'est donc pas seulement dépendante de la qualité ou de l'intensité du stimulus, mais aussi de récepteurs internes. Ainsi selon ce modèle, plus la sensation globale est chaude (ou fraîche), plus la sensation locale fraîche (ou chaude) procure un confort local important. Par exemple Plus la sensation globale est chaude (ou froide), plus le confort résultant d'un refroidissement local (ou d'un chauffage) est important.

2.2.3 Inconforts locaux

Dans le cas où le corps humain est en situation de neutralité thermique ($L=0$), il peut tout de même y avoir insatisfaction thermique du fait d'un refroidissement ou d'un réchauffement local non désiré du corps. On parle alors d'inconforts locaux, décrits par les deux normes thermiques ([EN ISO 7730, 2006] et [ASHRAE, 2004] auxquels sont principalement sujet les personnes en activité sédentaire légère. Les modèles analytiques de Fanger ou Gagge décrivant l'état thermique global du corps, ne suffisent donc pas à décrire le confort thermique des individus. Ces inconforts locaux peuvent être causés par des courants d'air, un gradient de température élevé entre la tête et la cheville, un sol trop chaud ou trop froid ou une asymétrie de rayonnement thermique importante. A ces gènes sont associées un pourcentage prévisible de population dérangé, déterminé empiriquement à partir de régression logistique [Olsen et al, 1985], ce qui rejoint le mode d'évaluation utilisé avec le PMV/ PPD.

- Le courant d'air :

Le modèle du pourcentage d'insatisfaits d  à la g ne par courant d'air, noté DR (Draught Rate), est évalué par l'équation suivante :

$$DR = (34 - T_a) \cdot (\bar{U} - 0,05) \cdot 0,62 \cdot (0,37 U \cdot T_u + 3,14) \quad (7)$$

O  : DR est la g ne par courant d'air (%);
 T_a est la température de l'air ( C);
 \bar{U} est la vitesse moyenne de l'air en admettant toujours $U \geq 0,05$ ($m \cdot s^{-1}$);

$T_u = \frac{100 \times U}{\sigma_v}$ est l'intensité de turbulence allant de 10% à 60% (40% si la valeur n'est pas connue) (%)
 σ_v est l'écart-type de la distribution des vitesses d'air ou turbulence absolue ($m \cdot s^{-1}$).

Comme énoncé auparavant, ce modèle s'applique aux sujets dont la sensation thermique est proche de la neutralité pour le corps entier, la gêne étant plus faible pour des activités plus intenses que le travail sédentaire (> 1,2 met) et pour des sujets estimant avoir plus chaud qu'à la neutralité thermique [EN ISO 7730, 2006]. Le modèle prévoit la gêne au niveau du cou et aura tendance à la surestimer au niveau des pieds et des bras. La non-connaissance du niveau de turbulence peut également entraîner des imprécisions de mesure du DR , de même que l'effet de la fréquence des fluctuations [Hoffmann, 1994].

- L'asymétrie de rayonnement :

L'asymétrie de rayonnement est définie par la différence des températures radiantes moyennes qui règnent de part et d'autre de l'individu. Elle peut résulter de la présence de parois froides (vitrage ou mur extérieur mal isolé, plafond rafraîchissant, etc.) ou chaudes (vitrage ensoleillé, émetteur de chaleur rayonnant trop proche, etc.). Les individus sont généralement plus sensibles à l'asymétrie de rayonnement causé par des plafonds chauds ou des murs (fenêtres) froids. Selon l'origine de cette asymétrie, le pourcentage d'insatisfaits (PD, de l'anglais *percentage dissatisfied*) a été décrit selon les équations suivantes [EN ISO 7730, 2006], en fonction de la différence de température entre la paroi froide et la paroi chaude Δt_{pr} :

- Plafond chaud :

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(2,84 - 0,174 \cdot \Delta t_{pr})} - 5,5 \quad \text{avec } \Delta t_{pr} < 23 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

- Mur froid :

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 \cdot \Delta t_{pr})} \quad \text{avec } \Delta t_{pr} < 15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

- Plafond froid :

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(9,93 - 0,5 \cdot \Delta t_{pr})} \quad \text{avec } \Delta t_{pr} < 15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

- Mur chaud :

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(3,72 - 0,052 \cdot \Delta t_{pr})} - 3,5 \quad \text{avec } \Delta t_{pr} < 35 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11)$$

- Le gradient vertical de la température d'air :

La relation exprimant le pourcentage de personnes insatisfaites en fonction de la différence verticale de température d'air entre la tête et les chevilles $\Delta t_{a,v}$ (uniquement lorsque $\Delta t_{a,v} < 8 \text{ } ^\circ\text{C}$) s'écrit [EN ISO 7730, 2007] :

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856 \cdot \Delta t_{a,v})} \quad (12)$$

L'insatisfaction est bien moindre quand la température aux pieds est supérieure à celle de la tête.

- La température du sol :

Les individus peuvent ressentir une gêne au niveau des pieds si la température du sol (t_{sol}) est trop basse ou trop élevée. Le pourcentage d'insatisfaits dans ce cas se calcule au moyen de l'équation suivante :

$$PD = 100 - 94 \cdot \exp(-1,387 + 0,118 \cdot t_{sol} - 0,0025 \cdot t_{sol}^2) \quad (13)$$

2.2.4 Approche adaptative

Les indices de confort thermiques de Fanger (*PMV* et *PPD*), pris pour référence dans les normes, ont été déterminés à partir de données subjectives issues d'études en chambres climatiques réalisées sous des conditions stationnaires et homogènes, dans le cas où un état d'équilibre avait été atteint. Ces indices exigent une connaissance du pouvoir isolant des vêtements et du métabolisme et paraissent difficilement applicables aux bâtiments sans conditionnement ou en situation variable, d'autant plus que l'intervention du sujet sur la régulation de son environnement n'est pas prise en compte.

De nombreuses expériences ([De Dear, 1985] ; [Bush, 1990]) ont ainsi montré des écarts importants entre les conditions de confort rencontrées in situ et celles prévues (par le *PMV* ou le *SET*), notamment dans les bâtiments non climatisés, où l'intervalle de confort est plus large que celui prévu. Ces écarts sont dus à l'interaction dynamique entre les sujets et leurs environnements. L'homme est ainsi considéré comme un élément actif qui s'adapte et adapte son environnement pour garantir son confort. On parle alors d'approche adaptative.

Cette approche, repose sur différents mécanismes adaptatifs qui se traduisent par des boucles rétroactives représentant les interactions dynamiques et multidisciplinaires entre l'homme et son environnement. De Dear et al. (1998) définissent trois catégories d'adaptation : comportemental, physiologique (acclimatation) et psychologique (accoutumance et expectative), telles que décrites sur la Figure 4.

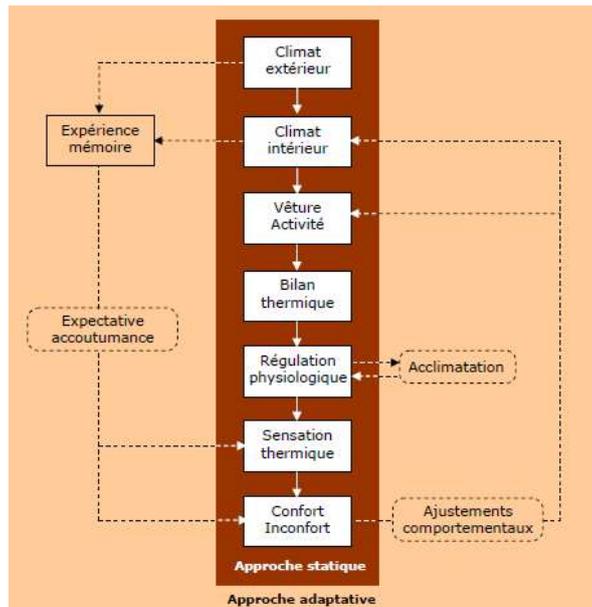


Figure 4 : Représentation des mécanismes adaptatifs ([Moujalled, 2007] dans [De Dear et al, 2003])

- Les modèles du confort adaptatif

De nombreuses études in situ réalisées à travers le monde (pour différents climats, saisons et cultures) ont montré que la température de confort était fortement corrélée à la moyenne de la température intérieure mesurée et que le confort thermique pouvait être atteint sur un large intervalle de température intérieure. D'après la Figure 5, il existe une corrélation linéaire entre la température de neutralité et la température extérieure moyenne mensuelle dans le cas de bâtiments ventilés naturellement, ce qui n'est pas le cas de bâtiments climatisés.

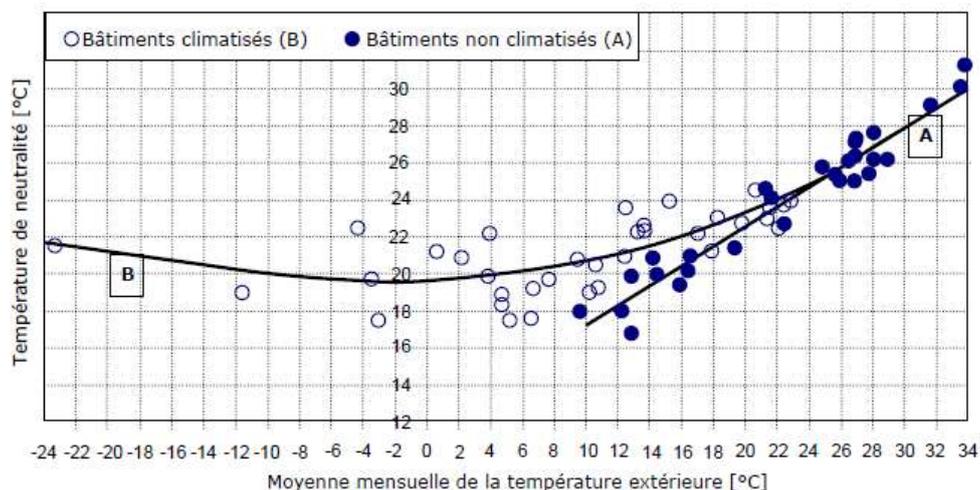


Figure 5 : Relation entre la température intérieure mesurée et la température moyenne extérieure – bâtiments avec ventilation naturelle et des bâtiments intégrant l'air conditionné selon [De Dear et al, 1998]

Partant de ce constat, différents auteurs ont proposé une expression de la température de confort en fonction de variables décrivant le climat extérieur et parfois selon le type de bâtiment (climatisé/ventilé naturellement). Les variables choisies sont la moyenne mensuelle de température extérieure (T_{mm}) ou plus généralement la température extérieure moyenne journalière glissante (T_{RM80}), qui permet de prendre en compte les variations séquentielles du climat extérieur et donc

l'aspect dynamique du confort thermique, tout en donnant davantage de poids aux expériences récentes au détriment des expériences les plus anciennes.

A titre d'exemple, les équations des températures de confort pour les bâtiments naturellement ventilés, proposées dans les normes européennes et américaines sont les suivantes :

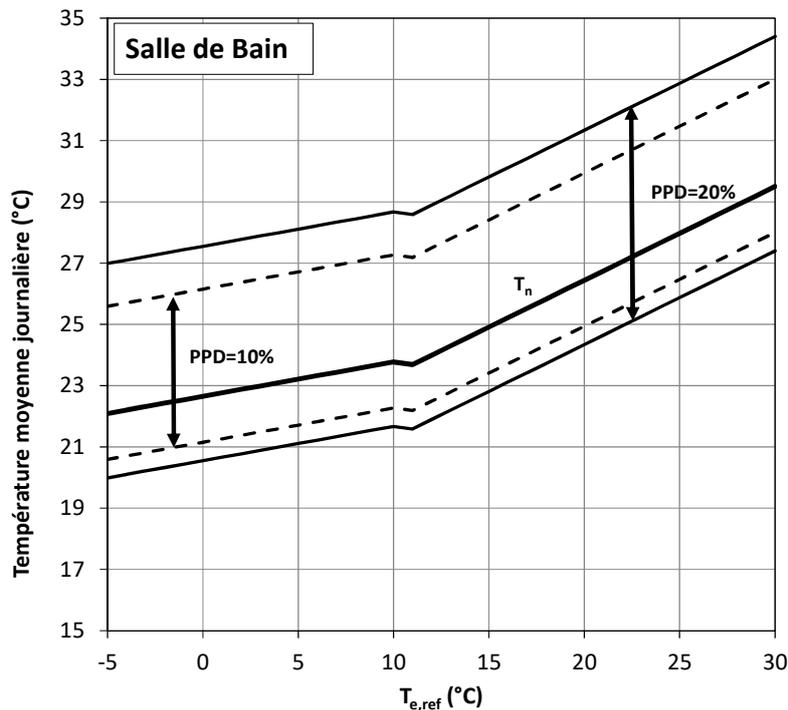
$$T_{c_EN15251} = 0,33 \times T_{RM80} + 18,8 \quad (\text{EN 15251, 2007})$$

$$T_{c_ASHRAE} = 0,31 \times T_{mm} + 17,8 \quad (\text{De Dear et al, 1998})$$

2.2.5 Cas des logements

Peeters et al. (2009) ont montré une corrélation entre les températures de confort dans les bâtiments résidentiels et les données météorologiques, notamment vis à vis des températures extérieures des 2 à 3 jours antérieurs. Ils se sont alors intéressés au confort thermique dans les logements sous l'angle de l'approche adaptative et ont distingué trois zones pour lesquelles les limites de confort thermique diffèrent : la chambre, la salle de bain et les autres pièces (Figure 6).

Il est possible de noter des températures de confort plus élevées dans la salle de bain ainsi que des limites basses pouvant aller jusqu'à 16°C en hiver pour la chambre. La non-symétrie de la bande de confort autour de la température de neutralité traduit la meilleure acceptation de températures plus chaudes, plutôt que plus froides.



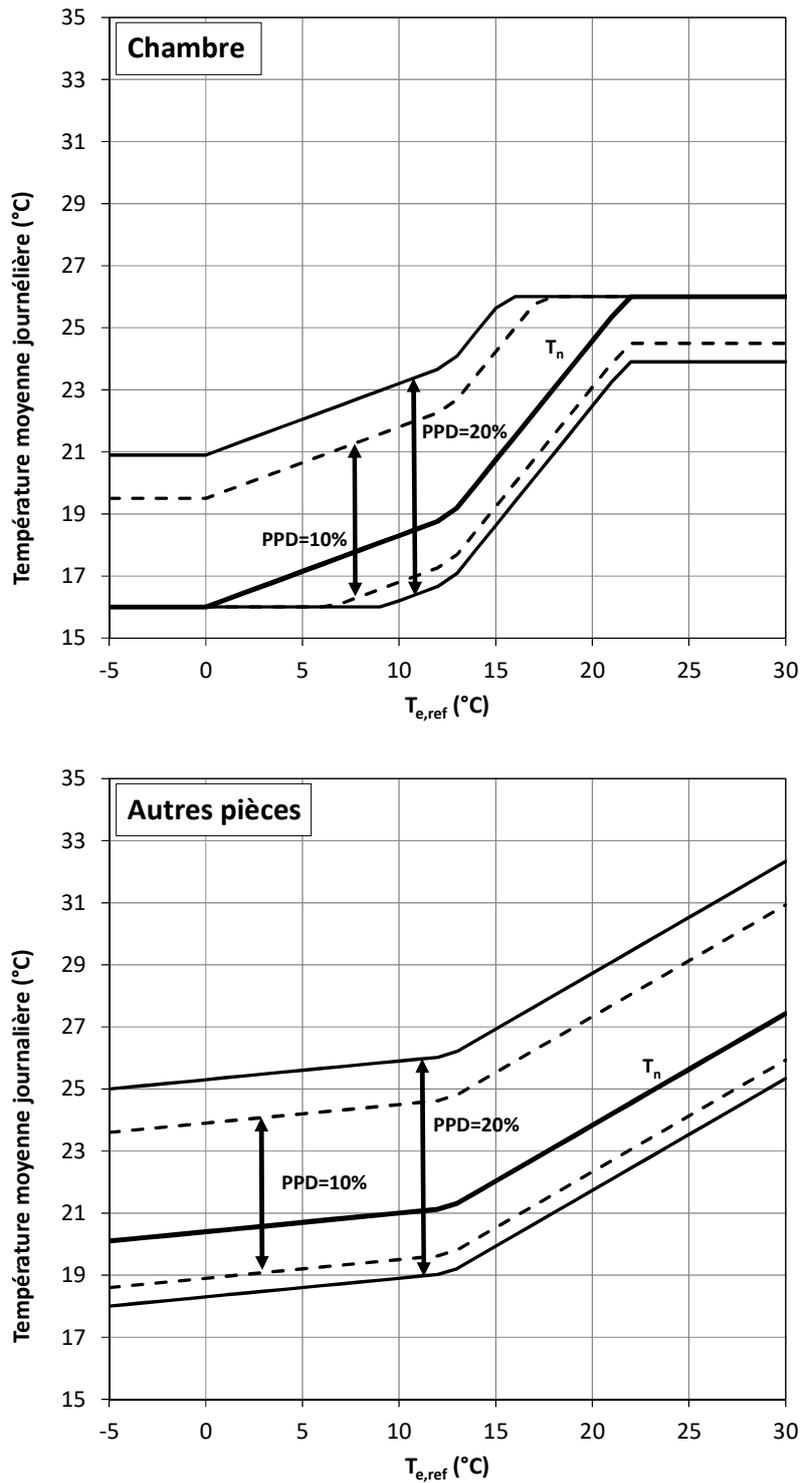


Figure 6 : Limites de confort thermique dans les logements.

2.3 Indices de confort thermique et hygrothermique

Les nombreux indices de confort thermique relevés dans la littérature (Dhalluin, 2012) ont été élaborés à partir de travaux empiriques et d'approches statistiques, réalisées dans des chambres climatiques ou in situ, sur des mannequins ou avec des êtres humains, simplifiant ainsi la complexité des phénomènes.

Le PMV et le PPD définis par Fanger et décrits précédemment ne sont pas repris ici.

2.3.1 Température opérative

2.3.1.1 Définition

La température opérative est définie comme la température uniforme d'une ambiance fictive qui générerait une intensité des échanges sensibles (par convection et rayonnement) identique à celle enregistrée entre l'individu et son environnement réel. Ainsi, elle combine les températures de surface des parois, la température et la vitesse de l'air, tel que :

$$T_{op} = \frac{h_c T_{air} + h_r T_{rm}}{h_c + h_r} \quad (14)$$

Si $v_{air} < 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ ou $T_{air} - T_{rm} < 4^\circ\text{C}$, alors $T_{op} = A.T_{air} + (1 - A) T_{rm}$.

Où : T_{op} : température opérative (K) ;
 T_{air} : température de l'air de la pièce (K) ;
 T_{rm} : température radiante moyenne de la pièce (K) ;
 h_c : coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) ;
 h_r : coefficient linéarisé de transfert de chaleur par rayonnement ($\text{W. m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) ;
 v_{air} : vitesse relative de l'air (m.s^{-1}) ;
 $A = 0,5 + 0,2v_{air}$.

Elle peut être mesurée par un globe noir (de 40 mm ou 15 mm) placé au centre de la pièce. Si la vitesse d'air est nulle ou négligeable, ce qui est souvent le cas lorsqu'il n'y a pas de courants d'air, la température opérative est approximativement la moyenne arithmétique de la température de l'air et de la température radiante moyenne. Si la vitesse est supérieure ou égale à 2 m.s^{-1} , la température opérative est égale à la température de l'air, les surfaces environnantes n'ayant plus d'effet.

Il existe également l'indice de température opérative humide (*WBGT : Wet Bulb Globe Temperature*) pour estimer la contrainte thermique en ambiance chaude. Elle requiert la mesure la température du globe noir (T_{gn}) et de la température humide naturelle (T_w) et se calcule de la manière suivante :

$$WBGT = 0,7 T_w + 0,3 T_{op} \quad (15)$$

2.3.1.2 Applications réglementaires

2.3.1.2.1 Tic (température intérieure conventionnelle)

La température intérieure conventionnelle d'un local, atteinte en été, notée Tic, est la valeur maximale horaire en période d'occupation de la température opérative. Pour le résidentiel, la période d'occupation considérée est la journée entière. Les modalités de calcul de la Tic sont définies par la méthode de calcul Th-BCE 2012 approuvée par un arrêté du ministre chargé de la construction et de l'habitation et du ministre chargé de l'énergie. Elle est calculée en utilisant des données climatiques conventionnelles pour chaque zone climatique (art. 6, arrêté du 26 octobre 2010).

Un maintien de cet indicateur en dessous d'un seuil maximal constitue l'une des obligations de résultat de la RT2012.

2.3.1.2.2 DH (Degré heure d'inconfort)

Les DH est la somme sur l'année de tous les écarts positifs de la température opérative à un seuil constant commun à tous les usages de bâtiment (par exemple 28°C).

2.3.1.2.3 DIES (Durée d'Inconfort d'Été Statistique)

La DIES est une durée d'inconfort pondérée par un taux d'insatisfaction calculé par rapport à un seuil évoluant selon température extérieure. La DIES intègre donc l'intensité de la surchauffe ainsi que sa

durée. Il fournit une information sur le confort effectivement ressenti par les occupants en prenant en compte l'adaptation à la météo extérieure, de façon semblable à la norme EN NF 15251.

La DIES a été introduite dans le moteur RT2012 dans le cadre de l'expérimentation E+ C- sans exigence associée (GE08, 2019) et est envisagée pour la nouvelle réglementation RE2020. Les températures opératives utilisées comme seuil d'inconfort γ sont corrigées (en journée uniquement) en fonction de la température extérieure et varient entre 28° à 30°C pour l'habitat (Figure 7). La DIES intègre également l'écart entre la température opérative et le seuil d'inconfort sous la forme de pourcentage d'insatisfait en appliquant la norme de confort thermique (ISO 7730) et en neutralisant les premier 10% (GE08, 2019).

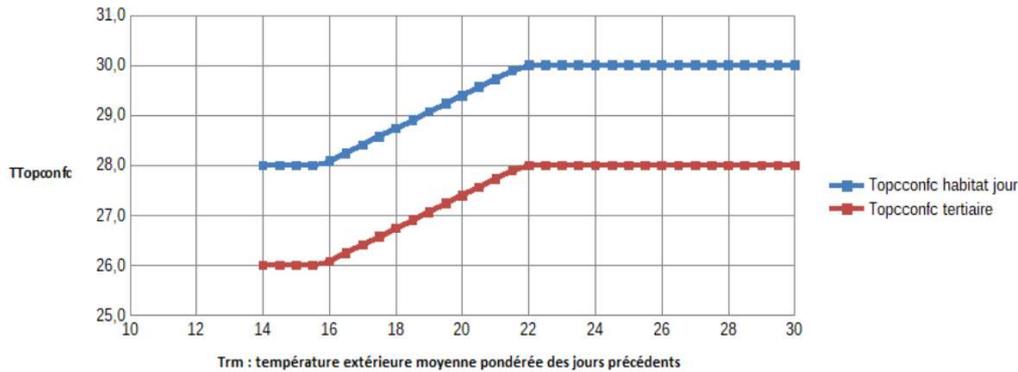


Figure 7 : Exemples de températures opératives utilisées comme seuils d'inconfort pour le calcul de la DIES (GE08, 2019).

2.3.2 ET*

La température effective ET^* est un indice développé par Gagge (Gagge, 1973) à partir d'expériences menées en chambre climatique et adopté par l'ASHRAE (ASHRAE, 1997). Il est défini comme la température uniforme virtuelle d'une ambiance à 50% d'humidité relative dans laquelle un sujet vêtu de manière standard serait marqué par une température et une mouillure de peau identiques à celles constatées dans la situation réelle. Cet indice prend donc en compte les effets de la température et de l'humidité et dépend de la vêtture et l'activité du sujet. Des échelles de confort basées sur cet indice ont été établies par l'ASHRAE pour des sujets ayant une vêtture de 0,6 clo et exerçant une activité faible (1 Met) dans une ambiance calme ($v_a < 0,2 \text{ m/s}$) (Annexe 1.2).

2.3.3 SET

Pour standardiser cet indice, l'ASHRAE a défini un nouvel indice, le SET, qui représente la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet, portant une vêtture standardisée par rapport à son activité, échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. La vêtture standardisée est calculée selon l'équation suivante (Gagge, 1986) :

$$I_{cis[clo]} = \frac{1,33}{(M_{[Met]} - W_{[Met]} + 0,74)} - 0,095 \quad (16)$$

Cet indice prend en compte l'effet des six paramètres de base et s'applique dans des conditions transitoires chaudes, modérées ou froides. Le Tableau 2 donne les sensations thermiques pouvant être déduites des différentes valeurs de SET (Parsons, 2003).

Tableau 2 : Relation entre la température standard effective SET et la sensation thermique (Parsons, 2003).

SET (°C)	Sensation	Etat physiologique d'une personne sédentaire
----------	-----------	--

> 37,5	Extrêmement chaud, très inconfortable	Echec de la régulation
34,5-37,5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30,0-34,5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25,6-30,0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
22,2-25,6	Confortable et acceptable	Neutralité
17,5-22,2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14,5-17,5	Froid et inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
10,0-14,5	Très froid, très inacceptable	Frissons

2.3.4 IADI

L'indice de confort thermique IADI (Indoor Air Discomfort Index) se calcule ainsi (Moschandreas et Sofuoglu, 2004), à partir de la température de l'air intérieur et l'humidité relative :

$$IADI = \frac{1}{L} \left[\sum_{i=1}^L 10 \frac{|CA_{i,opt} - CA_{i,obs}|}{CA_{i,ucl} - CA_{i,lcl}} \right] \quad (17)$$

Où : CA est un agent de confort, $CA_1=T$ (température) et $CA_2=RH$ (humidité relative) ;
 $L = 2$ (nombre d'agents de confort hygrothermiques pris en compte) ;
 $CA_{1,opt} = T_{opt} = 22^\circ C$, température considérée optimale ;
 $CA_{2,opt} = RH_{opt} = 45\%$, humidité relative considérée optimale ;
 $CA_{1,ucl} = 25^\circ C$ et $CA_{2,ucl} = 55\%$ sont les limites supérieures de confort ;
 $CA_{1,lcl} = 19^\circ C$ et $CA_{2,lcl} = 35\%$ sont les limites inférieures de confort ;
 $CA_{1,obs}$ ($^\circ C$) et $CA_{2,obs}$ (%) sont respectivement la température et l'humidité relative mesurées.

Moschandreas et Sofuoglu (2004) ajoutent les contraintes suivantes :

- $CA_{1,obs} = 28$ si $CA_{1,obs} > 28$;
- $CA_{1,obs} = 16$ si $CA_{1,obs} < 16$;
- $CA_{2,obs} = 65$ si $CA_{2,obs} > 65$;
- $CA_{2,obs} = 25$ si $CA_{2,obs} < 25$.

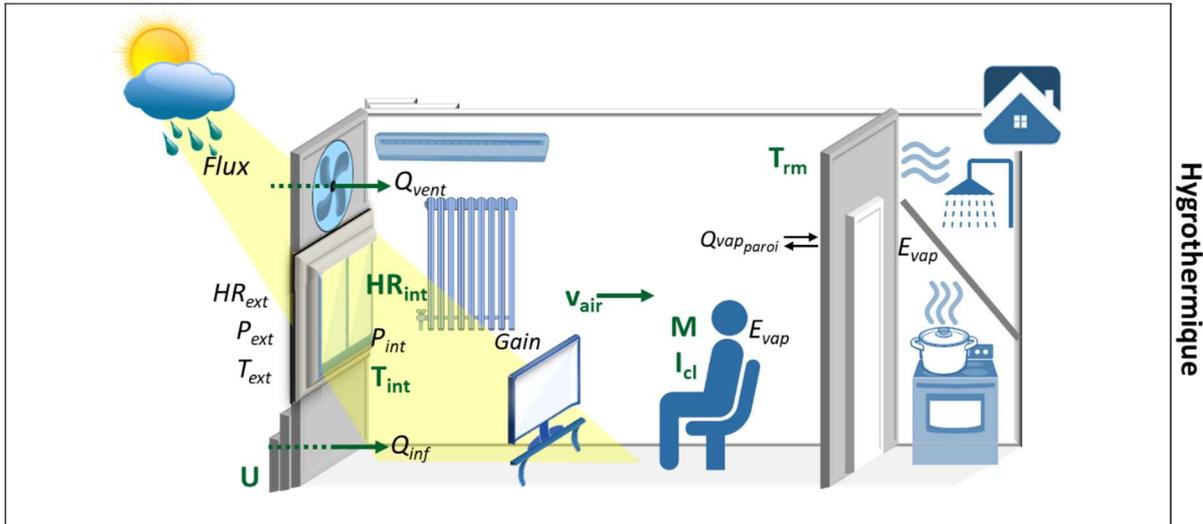
2.4 Synthèse

La Figure 8 illustre les différents prérequis, notamment en modélisation, nécessaires pour la détermination des indices suscités. Ils concernent :

- Les fichiers météo : apports solaires en énergie ainsi que l'humidité, la température et la pression extérieure ;
- L'enveloppe du bâtiment : isolation, infiltrations ;
- La ventilation ;
- Le système de chauffage ;
- L'activité métabolique des occupants ;
- Les sources internes d'humidité et de chaleur ;
- Les échanges aérauliques et par conduction entre pièces ;

- Les interactions avec les parois : effet tampon vis-à-vis de l'humidité dans le cas de matériaux poreux.

La Figure 8 illustre également les variables nécessaires au calcul des indices de confort hygrothermiques cités précédemment. L'ensemble de ces indicateurs pourront être évalués. Concernant les modèles thermophysiques, le modèle de Gagge doit permettre de calculer, à moindre coût en temps de calcul, les indicateurs de confort SET et ET*, des indicateurs largement répandus. Il offre un niveau de complexité cohérent avec les outils de modélisation nodale envisagés et à l'avantage d'être largement utilisé dans le secteur du bâtiment. Un niveau plus fin de description du fonctionnement métabolique des occupants ne semble pas nécessaire, à l'étape actuelle du projet.



$T_{int/ext}$: température de l'air intérieur/extérieur (K), HR : humidité relative (%), T_{rm} : température radiante moyenne (K), Q_{vent} : débit d'air de ventilation ($m^3.s^{-1}$), Q_{inf} : débit d'air d'infiltration ($m^3.s^{-1}$), $Q_{vap_{paroi}}$: flux de vapeur échangé avec les parois ($kg.s^{-1}$), $P_{int/ext}$ pression intérieure/extérieure (Pa), M : production de chaleur métabolique ($W.m^{-2}$), I_{cl} : isolation thermique des vêtements ($m^2.K.W^{-1}$), E_{vap} : émissions de vapeur ($kg.s^{-1}$).

Figure 8 : Vue schématique des variables utiles à la définition des indices de confort hygrothermique (vert) et des autres variables les influençant.

Le Tableau 3 récapitule la liste des indicateurs de confort hygrothermique décrits et des principales variables et principaux paramètres spécifiques à ces indicateurs. L'objectif est ici de fournir un aperçu de l'effort de modélisation nécessaire. L'ensemble de ces indicateurs sont calculables dans le cadre de ce projet bien que certains soient redondant. Il peut ainsi, par exemple, sembler pertinent de privilégier la DIES, potentiellement associée aux prochaines réglementations, par rapport à la Tic.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des indicateurs de confort hygrothermique décrits et des principaux paramètres et variables spécifiques à ces indicateurs.

Variables (en gras) ou paramètres spécifiques	Indicateurs décrits											
	PMV	PPD	Cour. Air	Assym. Ray.	T_{op}	Tic	DH	DIES	ET*/SET	PMV*	IADI	WBGT
T_a température de l'air (K)	x	X	x		x	x	x	x	X	x	x	
T_r température de rayonnement du corps (K)	x	x						x	x	x		
p_v pression partielle en vapeur d'eau (Pa)	x	x						x	x	x	x	

v_{air} vitesse relative de l'air (m.s ⁻¹)	x	x	x					x	x	x		
I_{cl} est l'isolement thermique du vêtement (m ² .K.W ⁻¹)	x	x						x	x	x		
h_c coefficient de transfert de chaleur par convection (W.m ⁻² .K ⁻¹)	x	x			x	x	x	x	x	x		
M production de chaleur métabolique M (W.m ⁻²)	x	x						x	x	x		
σ_v écart-type de la distribution des vitesses d'air ou turbulence absolue (m.s ⁻¹).			x									
Δt_{pr} différence de température entre la paroi froide et la paroi chaude				x								
t_{sol} température de surface du plancher bas (K)				x								
température extérieure moyenne journalière glissante (K)	x	x				x		x				
T_{rm} température radiante moyenne de la pièce (K)					x	x	x	x				
h_r coefficient linéarisé de transfert de chaleur par rayonnement (W. m ⁻² .K ⁻¹)					x	x	x	x				
Paramètres du modèle du Gagge									x	x		
T_w température humide naturelle (K)												x
T_{gn} température humide naturelle (K)												x

PMV : Predicted Mean Vote, PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied, Cour. Air : courant d'air, Assym. Ray. : assymétrie de rayonnement, T_{op} : Température opérative, T_{ic} : température intérieure conventionnelle, DH : Degré heure d'inconfort, DIES : Durée d'Inconfort d'Eté Statistique, ET* : température effective, SET : température effective standard, IADI : Indoor Air Discomfort Index.

3 Confort acoustique

3.1 Définition du niveau de pression acoustique

La pression acoustique $p(t)$, en Pascal (Pa), est la partie fluctuante de la pression totale autour d'une valeur moyenne constante P_{atm} représentant la pression atmosphérique au repos. Il s'agit d'une fonction généralement périodique qu'il est possible de décomposer en plusieurs sons purs de fréquences, en Hertz (Hz), données. Le spectre d'un son périodique est une représentation fréquentielle de la pression acoustique.

La propagation d'une onde sonore dans l'espace s'accompagne d'un transfert d'énergie. L'intensité acoustique est la puissance surfacique moyenne dans le temps (W.m^{-2}). Elle dépend notamment de la fréquence et de l'amplitude des composantes de la pression acoustique.

A 1000 Hz, la différence entre le seuil de sensibilité et le seuil de douleur est de l'ordre d'un facteur 10^6 pour la pression acoustique et d'environ 10^{12} pour son intensité. On définit alors une échelle logarithmique, plus pratique : le niveau de pression acoustique (L_p), en décibel (dB) dont la Figure 9 illustre les différentes échelles. Il peut s'exprimer, de façon simplifiée, sous cette forme :

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p_e^2}{p_0^2} \right) \quad (18)$$

Où :

- p_e est la pression acoustique efficace (Pa) entre deux instants t_1 et t_2 : $p_e^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$, p_e^2 est proportionnel à une intensité ;
- p_0 est une pression de référence qui correspond sensiblement à la plus faible pression que l'oreille est capable de déceler.

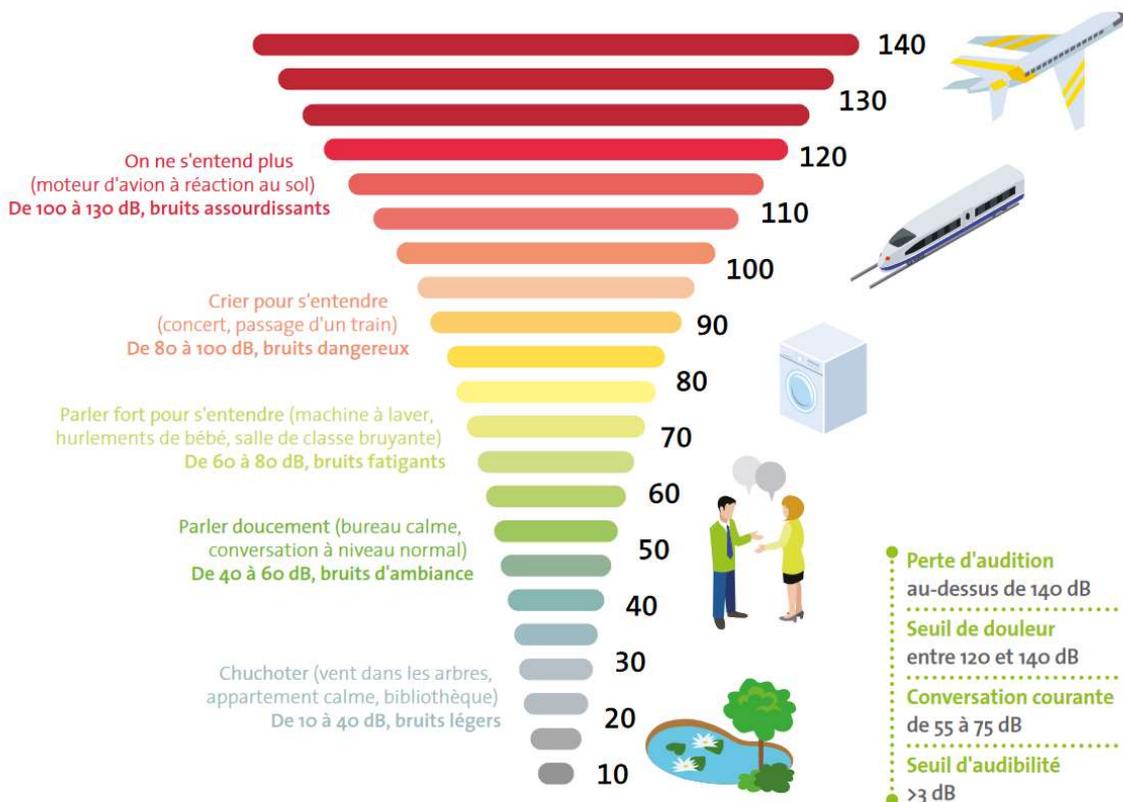


Figure 9 : illustration des niveaux de pression acoustique de différentes sources (ISOVER, 2018).

86% des personnes interrogées se disent gênées par le bruit à leur domicile et 85% à leur travail (IFOP 2014).

3.2 Acoustique du bâtiment

3.2.1 Textes de référence

Les normes utiles pour le calcul de la performance acoustique des bâtiments, à partir de la performance des éléments de construction, sont séparées en six parties :

- NF EN 12354-1 (août 2017) - Partie 1 : Isolement acoustique aux bruits aériens entre des locaux ;
- NF EN 12354-5 (septembre 2013) - Partie 5 : niveaux sonores dus aux équipements du bâtiment ;
- NF EN 12354-2 (août 2017) - Partie 2 : Isolement acoustique au bruit de choc entre des locaux ;
- NF EN 12354-4 (août 2017) - Partie 4 : Transmission du bruit intérieur à l'extérieur ;
- NF EN 12354-3 (août 2017) - Partie 3 : Isolement aux bruits aériens venus de l'extérieur ;
- NF EN 12354-6 (août 2004) - Partie 6 : Absorption acoustique des pièces et espaces fermés.

Ces normes permettent, à partir de bases de données sur les propriétés acoustiques des matériaux et d'informations sur l'enveloppe et les parois internes des bâtiments, d'accéder aux niveaux de bruits. Par exemple, le logiciel de calcul de performance acoustique AcouBAT (CSTB) est basé sur ces normes (Figure 10).

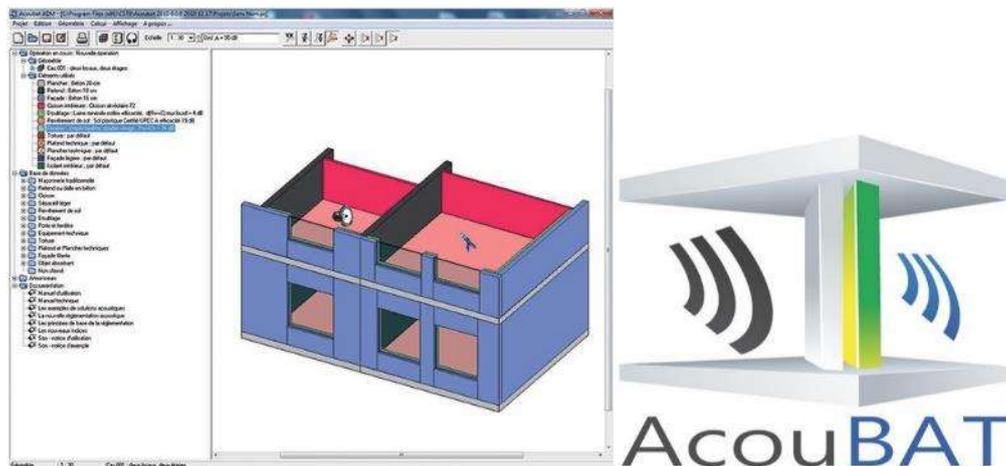


Figure 10 : Illustrations du logiciel AcouBAT (CSTB).

Ces normes distinguent trois types de bruits :

- Bruits aériens, émis au sein du local d'émission et se propageant de façon aérienne puis transmis au local de réception de façon directe, latérale ou parasite (Figure 11) ;
- Bruits de chocs transmis par les parois et le plancher ;
- Bruits d'équipements qui sont des sources traitées séparément dans la norme et peuvent se propager de façon particulière, par exemple par les conduits aérauliques pour le système de ventilation.

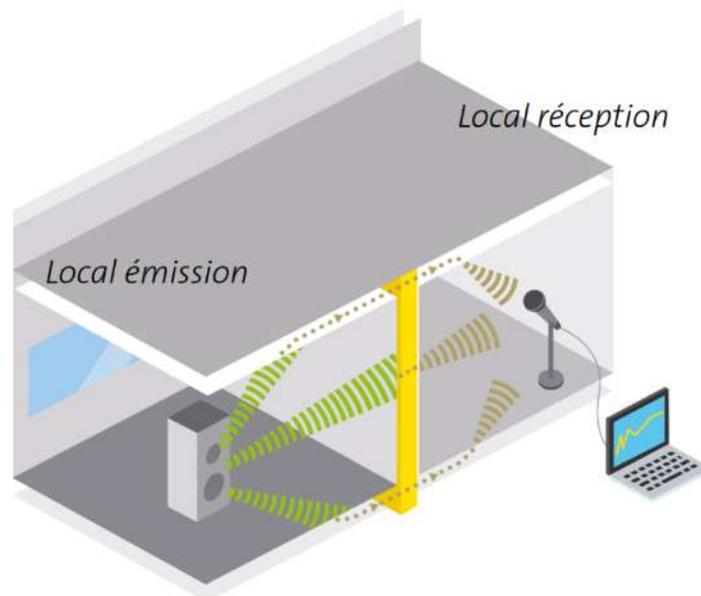


Figure 11 : Illustration du concept de local d'émission et de local de réception de la norme NF EN 12354 pour l'exemple d'un bruit aérien (ISOVER, 2018).

3.2.1.1 Bruits aériens

Deux notions sont définies pour caractériser la propagation des bruits aériens.

L'affaiblissement acoustique R mesure la quantité de bruit arrêtée par une paroi, en ne prenant en compte que les transmissions directes, à chaque fréquence f (en Hz). Cette grandeur peut ainsi se mesurer en laboratoire (Figure 12). Il est également possible de définir un facteur de transmission de la paroi τ tel que :

$$R = 10 \times \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (19)$$

L'isolement acoustique D mesure la quantité de bruit arrêtée entre deux pièces, en prenant en compte l'ensemble des transmissions (directes, latérales, parasites). Il varie également avec la fréquence du son fréquence f (en Hz). Contrairement à l'affaiblissement acoustique il n'est donc plus une propriété du matériau en lui-même et se mesure sur le chantier.

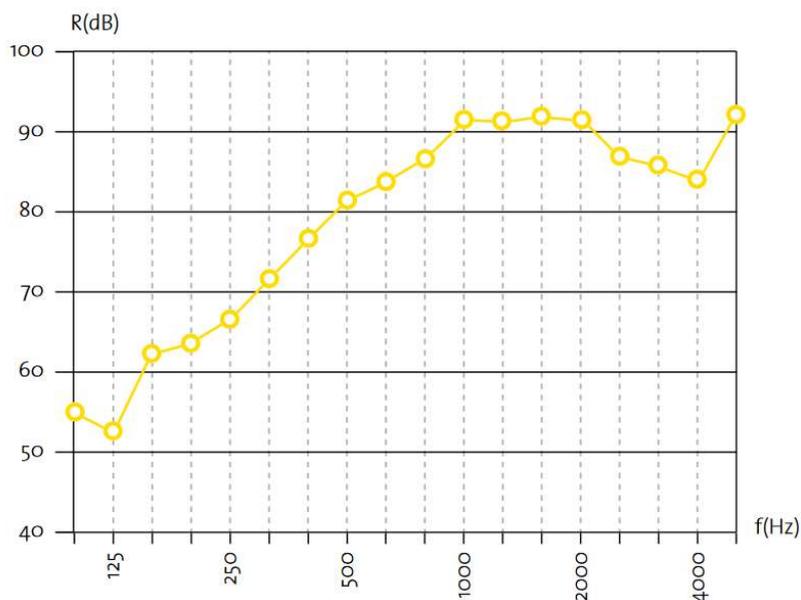


Figure 12 : Exemple de courbe d'affaiblissement acoustique pour un montage OPTIMA avec isolant GR32 d'épaisseur 100 mm et finition de type BA13, sur mur en blocs béton de 200mm (ISOVER, 2018).

3.2.1.2 Bruits de choc

Le concept de réduction du niveau de bruit de choc pondéré ΔL_w (ou d'amélioration au bruit de choc) est généralement utilisé et se définit par la différence de mesure de niveau acoustique entre un plancher isolé et un plancher en béton de 14 cm non isolé.

3.2.1.3 Bruits d'équipement

L'équipement émet un bruit à caractériser qui peut se transmettre de façon aérienne, par son support ou via des conduits hydrauliques ou aérauliques (cas des conduits de ventilation par exemple ou bruit dans les canalisations).

3.2.2 Exigences minimales pour les logements

L'arrêté du 30 juin 1999 définit les exigences réglementaires minimales pour les maisons individuelles, les maisons accolées et les logements collectifs. Les Figure 13 et Figure 14 récapitulent les valeurs minimales à respecter pour les bruits aériens intérieurs et extérieurs.

Isolement acoustique standardisé pondéré $D_{nT,A}$		Local de réception du bruit	
		Pièce principale (chambre ou séjour)	Cuisine ou salle d'eau
Local d'émission du bruit	Local d'un autre logement (hors garage)	≥ 53 dB	≥ 50 dB
	Circulation commune intérieure au bâtiment (couloir, escalier)	≥ 53 dB	≥ 50 dB
	Circulation intérieure commune au bâtiment si les locaux ne sont séparés que par une porte palière ou une porte palière et une porte de distribution	≥ 40 dB	≥ 37 dB
	Garage individuel ou collectif	≥ 55 dB	≥ 52 dB
	Local d'activité	≥ 58 dB	≥ 55 dB

Figure 13 : Valeurs minimales à respecter pour les bruits aériens intérieurs au sein des logements (ISOVER, 2018).

Catégorie de l'infrastructure	Niveau sonore de référence diurne L_{Aeq} (6 heures – 22 heures)	Niveau sonore de référence nocturne L_{Aeq} (22 heures – 6 heures)	Isolement minimum $D_{nT,A,tr}$
1	$L > 81$ dB(A)	$L \geq 76$ dB(A)	45 dB
2	$76 < L \leq 81$ dB(A)	$71 < L \leq 76$ dB(A)	42 dB
3	$70 < L \leq 76$ dB(A)	$65 < L \leq 71$ dB(A)	38 dB
4	$65 < L \leq 70$ dB(A)	$60 < L \leq 65$ dB(A)	35 dB
5	$60 < L \leq 65$ dB(A)	$55 < L \leq 60$ dB(A)	30 dB

Figure 14 : Valeurs minimales à respecter pour les bruits aériens extérieurs au sein des logements (ISOVER, 2018). Les catégories représentent différentes infrastructures de transports terrestres de niveaux de bruit différents.

En ce qui concerne les bruits de chocs, les niveaux de pressions pondérés doivent être inférieurs à 58dB, sauf pour les balcons et loggias non situés au-dessus d'une pièce principale, escaliers dans le cas où un ascenseur dessert le bâtiment, locaux techniques.

La Figure 15 récapitule les valeurs minimales à respecter pour les bruits des équipements.

Niveau de pression acoustique normalisé L_{nAT}	Local de réception du bruit	
	Pièces principales	Cuisine
Appareil individuel de chauffage ou appareil individuel de climatisation	< 35 dB(A)	< 50 dB(A)*
Installation de ventilation mécanique (débit minimal)	< 30 dB(A)	< 35 dB(A)
Équipement individuel d'un logement	< 30 dB(A)	< 35 dB(A)
Équipement collectif du bâtiment (ascenseur, chaufferie, transformateur, surpresseur d'eau, vide-ordures, etc.)	< 30 dB(A)	< 35 dB(A)

* Si la cuisine ouverte est sur une pièce principale, la valeur est réduite à < 40 dB(A)

Figure 15 : Valeurs minimales à respecter pour les bruits d'équipements au sein des logements (ISOVER, 2018)

3.3 Indices de confort acoustique

3.3.1 L_{Aeq}

Les descripteurs énergétiques intégrés prennent en compte le cumul des bruits sur une période donnée (jour, nuit, 24 heures ou plus). On citera en particulier le L_{Aeq} (niveau sonore équivalent) et ses dérivés comme le L_{den} , L_{night} , L_{day} , $L_{evening}$. Ces indicateurs permettent donc de caractériser une exposition de long terme. Les acousticiens ont au fil du temps construit des indicateurs utilisant des pondérations définies arbitrairement, censées représenter la gêne ressentie du fait des émissions sonores, laquelle varie selon le moment de la journée et le type de sources. L'indicateur L_{den} (*day, evening, night*), qui donne plus de poids au bruit le soir (on ajoute 5 dB à la valeur mesurée, de 18 à 22h) et la nuit (+10 dB de 22h à 6h) est de plus en plus utilisé.

On citera les valeurs guide de l'OMS en termes de confort sonore à l'intérieur des bâtiments :

- $L_{Aeq} = 35$ dB(A) pour l'intérieur des logements, salles de classes et jardins d'enfants.
- $L_{Aeq} = 30$ dB(A) pour l'intérieur des chambres à coucher, salles de repos des jardins d'enfants, ainsi que pour les salles et chambres d'hôpitaux.

3.3.2 L_{max}

Les descripteurs événementiels comme le niveau de pression maximal (L_{max}) ou le SEL (*sound exposure level*) caractérisent un événement sonore considéré isolément et prennent en compte la caractéristique d'émergence forte de certains bruits. Le L_{max} qui mesure la valeur maximale du niveau sonore est le plus utilisé sur le plan international. Il est généralement exprimé en dB(A).

3.3.3 NR/ISO

Pour déterminer les différents critères du confort acoustique d'un local, l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) a proposé plusieurs courbes qui correspondent toutes à un certain degré de confort acoustique (ou de gêne) : courbes d'évaluation du bruit, ou courbes NR (*Noise Rating*), appelées également courbe ISO. Grâce à ces courbes, il est possible de déterminer au moyen d'un seul chiffre le niveau de pression acoustique maximum autorisé dans chaque bande d'octave.

Le Tableau 4 présente les niveaux de confort acoustique d'une ambiance en fonction de la valeur de l'indice NR/ISO. La Figure 16 illustre la détermination du niveau NR/ISO d'une ambiance intérieure.

Tableau 4 : Niveau NR/ISO d'une ambiance intérieure.

Niveau NR/ISO	Niveaux de confort acoustique
20	Conditions excellentes d'écoute, salles de concert, studios d'enregistrement
25	Très bonnes conditions d'écoute, auditoriums, théâtres, églises, salles de conférence
20 - 30	Condition de séjour, de repos, de sommeil, maisons d'habitation, hôtels, appartements
30 - 35	Bonnes conditions d'écoute, bureaux de direction, salles de classe, bibliothèques
35 - 40	Conditions d'écoute normales, grands bureaux, restaurants calmes, commerces
40 - 45	Conditions d'écoute modérées laboratoires, restaurants, bureaux de dessin

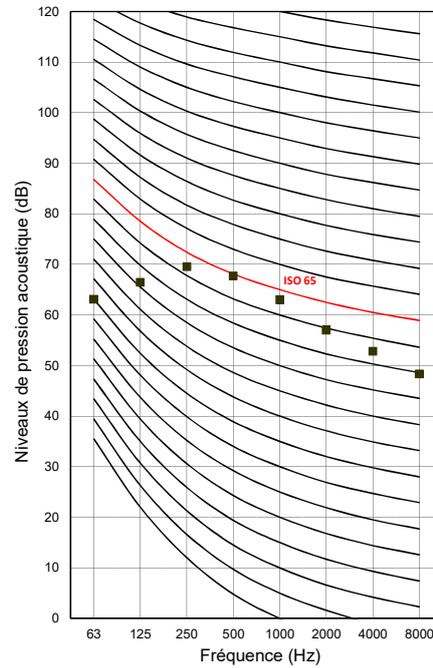


Figure 16 : Niveau NR/ISO d'une ambiance intérieure.

3.3.4 Temps de réverbération

Il s'agit de la durée (en seconde) nécessaire pour que le niveau sonore existant dans un local décroisse de 60 dB, ou que l'intensité d'un son diminue d'un facteur 10^6 , après extinction de la source (Figure 17). La durée de réverbération est déterminée par bandes d'octave pour les fréquences de 125 Hz à 4 000 Hz (NF EN ISO 3382-2, 2010) et se calcule selon la formule de Sabine :

$$T_r = 4 \cdot V \cdot \frac{\ln 10^6}{c \cdot A} = 0,163 \times \frac{V}{A} \quad \text{avec } A = \sum_i S_i a_i \quad (20)$$

Où :

- A : surface absorbante d'une salle (m^2) ;
- a_i : coefficient d'absorption acoustique d'une surface dépendant du matériau de revêtement et des couches sous-jacentes (sans unité) ;
- S_i : surface d'une paroi (m^2) ;
- c : vitesse du son = $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- V : volume de la salle (m^3).

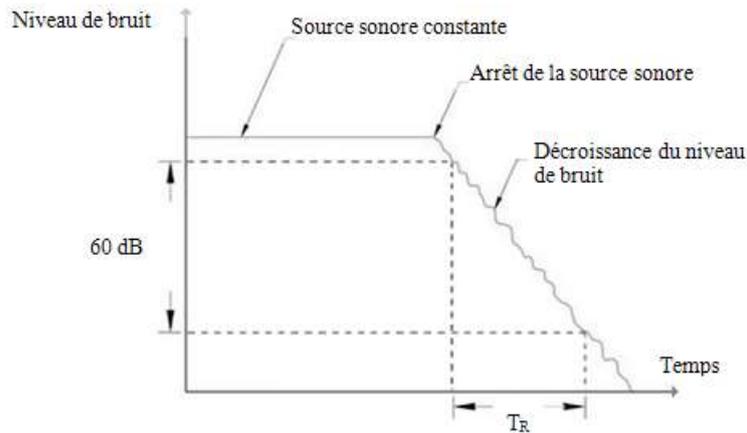


Figure 17 : Représentation de la décroissance du son dans un local après coupure de la source (Dhalluin, 2012)

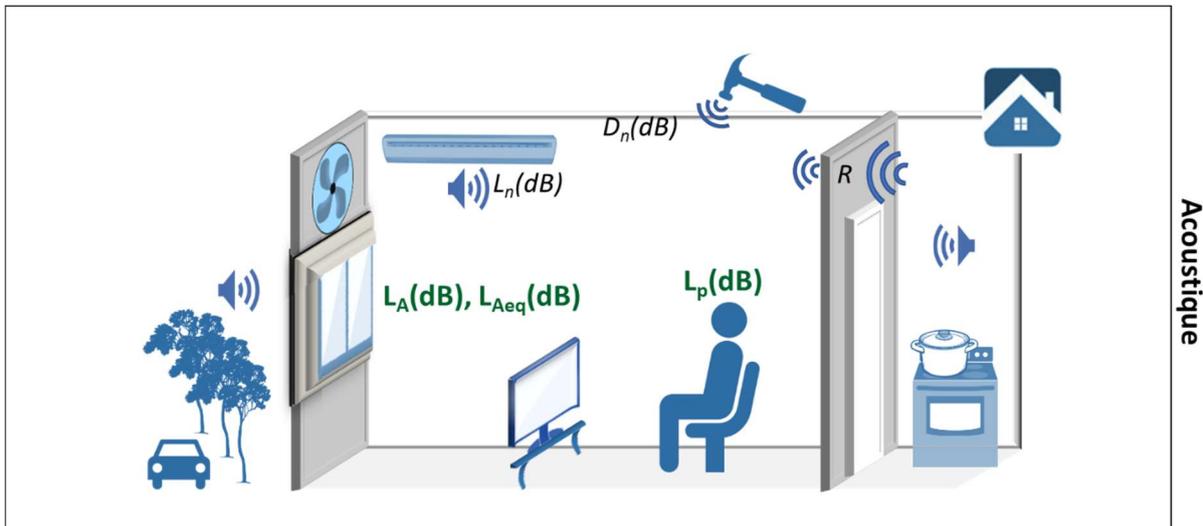
Knudsen (1957) propose un temps de réverbération optimal en fonction du volume du local :

$$T_{r_{opt}} = 0,32 + 0,17 \times \log(V) \quad (21)$$

Plus le local contient de matériaux absorbants ou plus le local est petit, plus la durée de réverbération est courte. Les salles sourdes à très faible T_r utilisée pour les essais acoustiques, ont une ambiance acoustique oppressante. Les T_r compris entre 0,5 s et 1 s améliorent l'intelligibilité de la parole et les T_r plus longs sont recherchés pour le rendu de la musique.

3.4 Synthèse

La Figure 18 illustre les variables nécessaires au calcul des indices de confort acoustique cités précédemment. On remarque que celles-ci sont spécifiques au domaine acoustique : une étude indépendante est donc possible. Le logiciel de calcul de performance acoustique AcouBAT (CSTB) permet l'estimation avant et après rénovation des indicateurs cités et son utilisation est donc envisagée dans le cadre de cette étude.



R : affaiblissement acoustique (dB), D_n : isolement acoustique (dB), L_n : niveau de pression acoustique normalisé (dB), L_{Aeq} : niveau sonore équivalent (dB), L_p : niveau de pression acoustique (dB).

Figure 18 : Vue schématique des variables utiles à la définition des indices de confort acoustique (vert) et des autres variables les influençant.

La plupart des principaux actes de rénovation pourront influencer les bruit d'équipements (ventilation et système de chauffage) ou l'affaiblissement et l'isolement acoustique, vis-à-vis des bruits extérieurs et intérieurs (isolation, fenêtres et finitions).

Le Tableau 5 récapitule les indicateurs de confort visuel décrits et les principaux paramètres et variables spécifiques à ces indicateurs.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des indicateurs de confort acoustique décrits et des principaux paramètres et variables spécifiques à ces indicateurs.

Variables (en gras) ou paramètres spécifiques	Indicateurs décrits				
	L _{Aeq}	L _{max}	Norme ISO	T réverb	R aff.ac.
Isolement acoustique	x	x	x		
Bruit d'équipement (niveau de pression acoustique normalisé)	x	x	x		
Bruits aérien extérieurs (niveau sonore de référence)	x	x	x		
Facteur de transmission de la paroi				x	
Géométrie	x	x	x		x
Coefficient d'absorption acoustique					x

L_{Aeq} : niveau sonore équivalent, L_{max} : niveau de pression maximal, T réverb : temps de réverbération, R aff.ac. : affaiblissement acoustique.

4 Confort visuel

4.1 Définitions

4.1.1 Les différentes grandeurs physiques utiles

Afin de prendre en compte le confort visuel, il est nécessaire de caractériser la lumière visible (longueur d'onde comprise entre 380 et 780 nm) par rapport à la manière dont l'œil perçoit l'onde (photométrie).

Cette science s'appuie sur différents concepts (Figure 19) :

- Le flux lumineux en lumen (lm) caractérise la puissance lumineuse de la source dans toute les directions, rapportée à la sensibilité de l'œil.
- L'intensité lumineuse en candela (cd) : flux lumineux émis par une source dans une direction donnée. 1 Candela correspond à l'intensité lumineuse produite par 1 bougie.
- L'éclairement en lux (lx) est le flux lumineux reçu par unité de surface éclairée.
- La luminance en candela.m⁻² (cd.m⁻²) caractérise l'intensité lumineuse émise par unité de surface de la source. Elle sert à évaluer les risques d'éblouissement. Une source devient éblouissante en éclairage naturel à partir de 2000 cd.m⁻².
- La température de couleur en Kelvin (K) caractérise la teinte dominante d'une source lumineuse. Une teinte chaude correspond à une température $T < 3300$ K et une teinte froide à $T > 5000$ K. Plus la température des couleurs est élevée, plus le niveau d'éclairement doit être élevé.

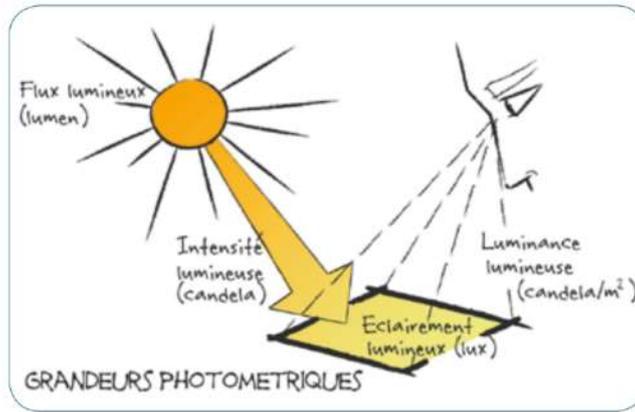


Figure 19 : Illustration des différentes grandeurs photométriques (ICEB et ARENE, 2014)

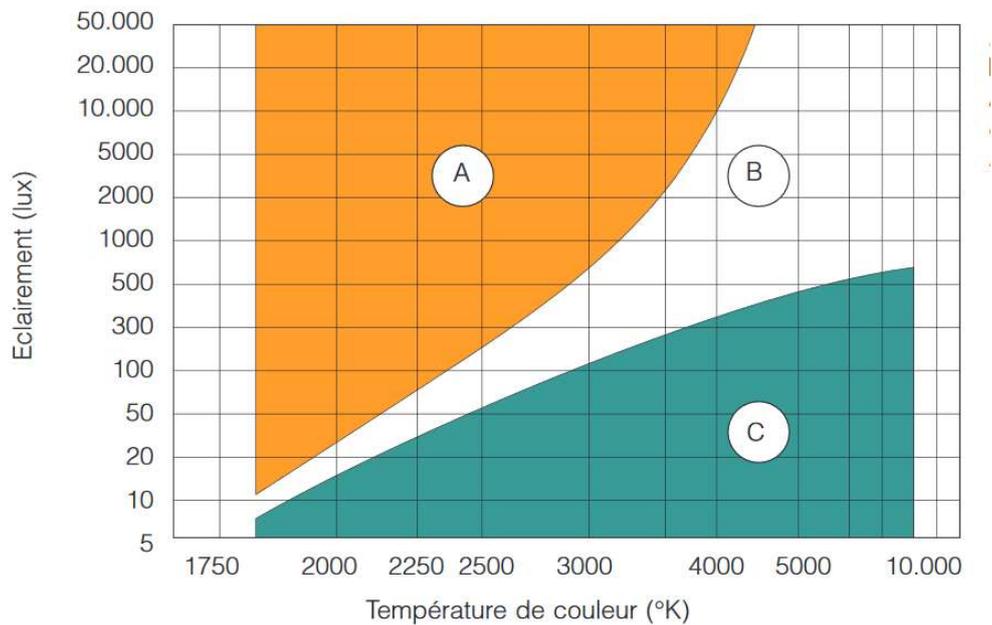


Figure 20 : Diagramme de Kruithof recommandant le niveau d'éclairage en fonction de la température de couleur (CSTC, 2011). Confort visuel optimal en zone B.

4.1.2 Le confort visuel et la lumière naturelle

Le confort visuel est une impression subjective liée à la quantité, à la distribution et à la qualité de la lumière.

Comme indiqué dans Reiter et De Herde (2004), les principaux paramètres du confort visuel sont :

- le niveau d'éclairage de la tâche visuelle ;
- un rendu des couleurs correct ;
- une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace ;
- les rapports de luminance présents dans le local ;
- l'absence d'ombres gênantes ;
- la mise en valeur du relief et du modelé des objets ;
- une vue vers l'extérieur ;
- une teinte de lumière agréable ;
- l'absence d'éblouissement.

Confort visuel et éclairage naturel sont ainsi intimement liés pour différentes raisons. En effet la lumière naturelle est celle à laquelle l'œil est le plus adapté et la qualité du rendu des couleurs est définie par rapport à celle-ci. Elle présente également des atouts vis-à-vis de la santé et du moral, notamment par sa variabilité, importante pour l'équilibre psychique et le maintien du cycle circadien. De façon indirecte, sa présence suppose souvent une vue vers l'extérieur, qui constitue également un des paramètres du confort visuel. La lumière artificielle peut être alors vue comme un complément à la lumière naturelle quand celle-ci s'avère insuffisante.

4.2 Textes et niveaux de référence

Les textes réglementaires traitent peu le confort visuel mais abordent la problématique de l'éclairage des bâtiments avec un point de vue principalement lié à la sécurité ou à des impératifs d'économie d'énergie. En effet, dans les articles R4213 et R4223 du code du travail, les recommandations du niveau d'éclairage minimum sont plutôt faibles (120 lux pour les locaux de travail non aveugles). L'article R. 232-7-4 précise néanmoins que les postes de travail situés à l'intérieur des locaux de travail doivent être protégés du rayonnement solaire gênant. Par ailleurs, la RT 2012 valorise l'apport de lumière naturelle et impose une surface de baies supérieure ou égale à 1/6 de la surface habitable (art. 20 de l'arrêté du 26 octobre 2010), ceci à des fins d'économies d'énergie (éclairage et chauffage).

La norme EN 12464-1 (2011), portant sur l'éclairage des lieux de travail, prend en compte le confort visuel vis-à-vis du type et de la pénibilité de travail. Les recommandations d'éclairage minimum y sont plus élevées que celles du code du travail et sont de l'ordre de 200 à 500 lux pour les bureaux (Figure 21). Cette norme prend également en compte la qualité du rendu des couleurs et les problématiques d'éblouissement. La norme française correspondante est la NF X 35-103.

La Norme NF EN 17037 (2018) régit la lumière naturelle (éclairage naturel) dans les bâtiments. Elle donne des recommandations minimales permettant d'obtenir une impression subjective de clarté à l'intérieur des bâtiments grâce à la lumière naturelle. Elle fournit des indicateurs et des informations pour exploiter l'éclairage naturel sans diminuer le niveau de confort pour les occupants. Elle traite en particulier du niveau en FLJ (Facteur lumière du jour, cf. partie 4.3), de la vue sur l'extérieur, de l'ensoleillement direct et de l'éblouissement.

Zones, tâches, activités	Éclairage moyen à maintenir (lux)	Indice d'éblouissement d'inconfort (UGR) minimal	Indice de rendu des couleurs (Ra) minimal
Zone de circulation et couloirs	100	28	40
Escaliers, quai de chargement	150	25	40
Magasins, entrepôts	100	25	60
Magasins de vente, zones de vente	300	22	80
Zones de caisse	500	19	80
Espaces publics, halls d'entrée	100	22	80
Guichets	300	22	80
Restaurants, hôtels	300	22	80
Réception, caisse, concierge			
Cuisines	500	22	80
Bâtiments scolaires, salle de classe en primaire et secondaire	500	19	80
Salles de conférences	500	19	80
Salles de dessin industriels	750	16	80

Éclairage des bureaux :			
- Classement	300	19	80
- Dactylographie, lecture	500	19	80
- Poste CAO	500	19	80
- Réception	300	22	80
- Archives	200	25	80

Figure 21 : Quelques prescriptions définies dans la norme NF EN 12464-1 (2011).

En ce qui concerne les niveaux d'éclairage minimum au sein des logements, plusieurs organismes fournissent des recommandations ou des référentiels de certification (Figure 22). Les certifications Habitat & Environnement et NF Habitat, par exemple, proposent des référentiels d'exigences, quantitatives et qualitatives, propres à l'éclairage naturel. Celles-ci se basent sur l'indice d'ouverture du logement (cf. 4.3.3) mais ne proposent pas de recommandations explicites sur les niveaux d'éclairage minimums.

Local et activité	Eclairage moyen
Hall d'entrée et couloirs	
Hall d'entrée	100 lx
Couloir et circulation	50 - 100 lx
Escalier	100 lx
Sanitaires	
Eclairage ambiant	200 lx
Eclairage du miroir et du lavabo	300 - 500 lx
Toilettes	100 lx
Cuisine	
Eclairage ambiant	200 - 300 lx
Eclairage du plan de travail	300 - 500 lx
Living – Salon	
Zone de repos (fauteuil, etc.)	50 - 200 lx
Lecture	300 lx
Salle à manger	
Eclairage général	100 lx
Eclairage de la table	100 - 300 lx
Chambre	
Eclairage général	100 - 200 lx
Zone de lecture (tête de lit)	300 lx
Débaras, buanderies, caves, garage, etc.	
Eclairage général	50 - 100 lx
Zone de travail (repassage, bricolage, etc.)	300 lx

Figure 22 : Exemple de recommandations d'éclairage moyen pour les logements. Recommandations du Centre Scientifique et Technique de la Construction, Belgique (CSTC, 2011).

4.3 Indices de confort visuel

4.3.1 Facteur lumière du jour (FLJ)

Le Facteur lumière du jour (FLJ) est le rapport entre l'éclairage naturel reçu par une surface intérieure et l'éclairage reçu par une surface horizontal extérieure par ciel couvert, sans ombrage.

$$I_{FLJP} = \frac{E_{P,omb}}{E_{P,sans-omb}} \quad (22)$$

Où :

- $E_{P,omb}$ est l'éclairement horizontal au point P en prenant en compte l'effet d'ombrage de la pièce ;
- $E_{P,sans-omb}$ est l'éclairement au point P s'il n'y avait pas d'effet d'ombrage.

Le FLJ dépend notamment de la position du point P considéré par rapport aux fenêtres. Il diminue de manière significative en fonction de la distance par rapport aux fenêtres (Figure 23) (Li and Tsang, 2008). La sensation de clarté est ressentie à partir d'un FLJ de 4%. Des niveaux moyens minimaux de FLJ par type d'ambiance peuvent être également définis comme par exemple 2% en séjour et 1,5% en chambre.

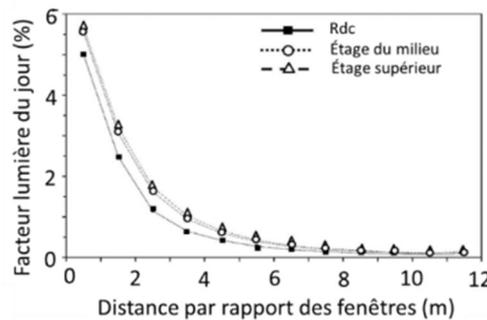


Figure 23 : Facteur de lumière du jour en fonction de la distance par rapport à une fenêtre (Li and Tsang, 2008).

Le Building Research Establishment (BRE) propose une formule analytique permettant d'estimer cet indice, de façon moyenne au sein de l'ambiance, à partir des propriétés de la pièce étudiée :

$$I_{FLJmoyen} = \frac{\sum_i S_{f_i} TL_i a_i}{S_t (1 - R^2)} \quad (23)$$

Où :

- S_{f_i} est la surface nette du vitrage i (m^2) ;
- TL_i est le facteur de transmission lumineuse du vitrage i (sans unité) ;
- a_i est l'angle du ciel visible depuis la fenêtre i et prend en compte à la fois les masques lointains et les masques proches, l'angle vaut 90° si aucun masque n'existe ($^\circ$) ;
- S_t est la surface totale de toutes les parois du local, vitrages compris (m^2) ;
- R est le facteur de réflexion moyen des parois du local (sans unité).

4.3.2 Autonomie d'éclairage naturel (AEN)

Cet indice évalue le pourcentage du temps pour lequel une exigence minimale d'éclairage naturel est atteinte (ASE 1989). De nombreux indices s'expriment sous une forme similaire afin de déterminer une fréquence d'atteinte du confort visuel (Carlucci et al., 2015).

Il peut s'exprimer ainsi :

$$I_{AEN} = \frac{\sum_i (w_{f_i} t_i)}{\sum_i t_i} \quad (24)$$

Avec :

$$w_{f_i} = \begin{cases} 1 & \text{si } E_{lim,inf} \leq E_{LJ} \leq E_{lim,sup} \\ 0 & \text{ou } E_{LJ}/E_{lim} \text{ sinon} \end{cases} \quad (25)$$

Où :

- t_i représente l'incrémentation du temps considérée (par exemple les heures de présence) ;
- E_{LJ} est l'éclairement dû à l'éclairage naturel ;
- E_{lim} est l'éclairement limite considéré, inférieur et/ou supérieur.

4.3.3 Indice d'ouverture et de profondeur

L'indice d'ouverture (I_o) (ou indice de vitrage) est le rapport de la surface d'ouverture (y compris menuiserie et vitrage) à la surface de la pièce. Cet indice est généralement utilisé par les labels comme garde-fous d'apport de lumière naturelle par la spécification de valeurs minimales requises. Une valeur minimale de 10-15% est généralement retenue pour au moins 80% de la surface totale des logements.

Par exemple le référentiel des certifications « Habitat & Environnement » (ICEB et ARENE, 2014) et NF Habitat donnent les références suivantes (pour au moins 80% des logements de l'opération ou 80 % des pièces suivantes des logements) :

- séjour, y compris séjour avec cuisine ouverte : $I_o \geq 15\%$;
- cuisine fermée : $I_o \geq 10\%$;
- chambre (au moins une par logement) : $I_o \geq 15\%$ (Habitat & Environnement).

Il est parfois fait référence à un indice de vitrage corrigé (I_c) qui inclus le facteur de transmission du vitrage comme correction.

L'indice de profondeur (I_p) est le ratio entre la profondeur du local et la hauteur sous linteau au-dessus de la surface utile. Il peut apporter des informations complémentaires par rapport à I_o ou I_c . Le Tableau 6 illustre la corrélation qu'il est possible d'établir entre le FLJ et les indices I_c (ou I_o) et I_p (ICEB et ARENE, 2014 ; Bernstein et al., 2007).

Tableau 6 : corrélation entre le FLJ et les indices I_c (ou I_o) et I_p (ICEB et ARENE, 2014 ; Bernstein et al., 2007). Pour le calcul $I_c - 5I_p$, la valeur de I_c est exprimée en pourcentage.

Classification	Valeur de ($I_c - 5I_p$)	Description	Valeur de I_{FLJmin} (%)
I	$I_c - 5I_p > 5$	Local très clair, éclairage naturel très abondant	$I_{FLJmin} > 2\%$
II	$0 < I_c - 5I_p < 5$	Local clair, éclairage naturel abondant	$1,5\% < I_{FLJmin} < 2\%$
III	$-5 < I_c - 5I_p < 0$	Local peu clair à sombre, éclairage naturel faible	$1\% < I_{FLJmin} < 1,5\%$
IV	$I_c - 5I_p < -5$	Local très sombre, éclairage naturel insuffisant	$I_{FLJmin} < 1\%$

4.3.4 Uniformité de l'éclairement

L'uniformité de l'éclairement est considérée comme un critère de confort visuel. L'indice d'uniformité de l'éclairement est un moyen simple de la représentée et peut s'exprimer ainsi :

$$I_U = \frac{E_{min}}{E_{ref}} \quad (26)$$

Où :

- E_{min} est l'éclairement minimal ;
- E_{ref} est l'éclairement de référence. Selon l'indice utilisé il peut s'agir de l'éclairement maximal (cas de la norme NF EN 12464-1) ou moyen.

4.3.5 Indices d'éblouissement

L'indice d'éblouissement unifié (UGR – Unified Glare Rating). Cet indice se calcule pour une position et une direction d'observation fixées.

Il peut s'exprimer ainsi :

$$I_{UGR} = 8 \log \left(\frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right) \quad (27)$$

Où :

- L_b est la luminance de l'arrière-plan ;
- L est la luminance de la source (par exemple du luminaire) ;
- ω est l'angle de vision de la source par l'observateur ;
- P est un indice lié à la position de l'observateur par rapport au luminaire.

Un I_{UGR} maximum d'environ 22 pour les locaux de vie et d'environ 28 pour les autres locaux sont des valeurs généralement conseillées. La norme EN 12464-1 recommande un I_{UGR} compris entre 19 et 28 pour les lieux de travail. Il commence à être perceptible pour une valeur d'environ 10.

Un autre indice, adapté à l'éclairage naturel, est le DGI (Daylight Glare Index) qui prend en compte la luminance moyenne du champ de vision caractérisant les conditions lumineuses auxquelles notre système visuel est adapté à cet instant. Plus récemment, le DGP (Daylight Glare Probability), a été introduit afin de palier à certaines critiques du DGI (surestimation de l'éblouissement).

Cet indice peut s'exprimer ainsi (Wienold et Christoffersen, 2005, Carlucci et al., 2015) :

$$I_{DGP} = 5,87 \cdot 10^{-5} E_v + 0,0918 \log_{10} \left(1 + \sum \frac{L^2 \omega}{E_v^{1,87} P^2} \right) + 0,16 \quad (28)$$

Où :

- E_v est l'éclairement vertical de la source.

L'équation est valide pour $0,2 < 0,8$ et $E_v > 380$ lux.

4.3.6 Indice de rendu des couleurs

La Commission internationale de l'éclairage (CIE) définit l'indice synthétique de rendu des couleurs (IRC) à partir de l'écart colorimétrique des couleurs que diffusent les plages d'un échantillon normalisé éclairés par la source à tester à par une source de référence ayant la même température de couleur et rayonnant comme un corps noir. On affecte à cette dernière la valeur 100.

La Figure 24 donne un ordre de grandeur de l'IRC des sources lumineuses classiques en intérieur.

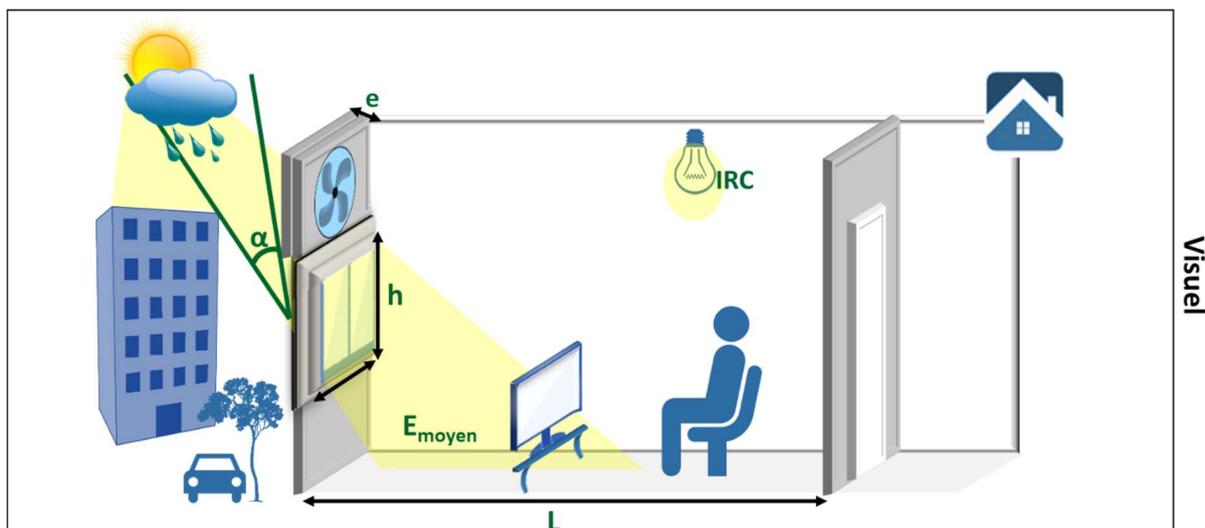
Type de source	Puissance [W]	Efficacité [lm/W]	T. de couleur [K]	IRC	Durée de vie [h]
Incandescence					
Standard	15 – 1000	8 – 18	2600 – 2900	100	1000
Halogène basse tension	50 – 2000	8 – 18	3000	100	2000
Halogène très basse tension	15 – 100	8 – 18	3000	100	2000 – 4000
Fluorescence					
Tubes fluorescents	18/36/58	8 – 18	2700 – 6500	66 – 98	8000 – 12000
Fluocompactes de substitution	5 – 23	8 – 18	2700 – 3000	85	8000
Fluocompactes d'intégration	5 – 55	8 – 18	2700 – 4000	85	8000 – 12000
A décharge					
Aux halogénures métalliques	20 – 2000	15 – 1000	3000 – 6000	65 – 85	6000 – 8000
A vapeur de sodium haute pression	35 – 1000	15 – 1000	2000 – 2500	80	8000 – 24000
LED					
LED	1,5 – 20	70 – 130	2600 – 10000	50 – 100	15000 – 40000

Figure 24 : Caractéristiques de différentes sources lumineuses (Cadiergues, 2012)

4.4 Synthèse

La plupart des indices de confort visuel identifiés se basent sur la disponibilité de l'éclairage naturel, dont les atouts vis-à-vis de la santé et du moral ont été rappelés en partie 4.3.1. La Figure 25 illustre schématiquement les variables utiles à la définition des indices de confort visuel qui se calculent, pour la plupart, à partir de considérations géométriques. Certains actes de rénovation peuvent donc les influencer. Un changement de dimensionnement des ouvrants constitue un exemple évident, mais une isolation par l'extérieur d'une paroi peut également influencer l'angle du ciel visible et donc les indices de confort visuel (Figure 25).

Parmi les indicateurs cités précédemment, certains semblent pouvoir être abandonnés pour cette étude. En effet l'indice de rendu des couleurs est très dépendant du choix de la technologie et de qualité de l'éclairage artificiel choisi par les occupants. Ce choix est indépendant des autres actes de rénovation. Par ailleurs les indices d'uniformité d'éclairage et d'éblouissement, très utilisés dans le secteur tertiaire, ne semblent pas pertinents dans le cadre de cette étude car peu influencés par les principaux actes de rénovation thermiques eux-mêmes mais sont plutôt dépendants d'agencement internes laissés à la liberté des occupants.



α : angle du ciel visible depuis la fenêtre ($^{\circ}$), e : épaisseur d'isolant extérieur ajouté (m), h : hauteur de la fenêtre et autres paramètres géométriques associés (m), IRC : indice de rendu des couleurs de l'éclairage artificiel, E_{moyen} : éclairage moyen (lx).

Figure 25 : Vue schématique des variables utiles à la définition des indices de confort visuel (vert) et des autres variables les influençant.

Le Tableau 7 récapitule les indicateurs de confort visuel décrits et les principaux paramètres et variables spécifiques à ces indicateurs.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des indicateurs de confort hygrothermique décrits et des principaux paramètres et variables spécifiques à ces indicateurs.

Variables (en gras) ou paramètres spécifiques	Indicateurs : x pour obligatoire, o pour facultatif						
	FLJ	FLJ _{moy}	AEN	lo / lc / lp	Uniformité	Eblouissement	Rendu couleur
$E_{P,omb}$ éclairage horizontal au point P en prenant en compte l'effet d'ombrage de la pièce et $E_{P,sans-omb}$ éclairage horizontal au point P s'il n'y avait pas d'ombrage	x	o					
surface nette du vitrage		x		x			
facteur de transmission lumineuse du vitrage		x					
angle du ciel visible depuis la fenêtre		x					
surface totale de toutes les parois du local		x					
facteur de réflexion moyen des parois du local		x					
éclairage dû à l'éclairage naturel			x				
éclairage limite considéré / réf			x		x		

Surface pièce				x			
Eclairage minimal					x		
luminance de l'arrière-plan						x	
luminance de la source						x	
angle de vision de la source par l'observateur						x	
P indice lié à la position de l'observateur par rapport au luminaire						x	
URC des luminaires							x

FLJ : facteur lumière du jour, moy : moyen, AEN : autonomie d'éclairage naturel, lo / lc / lp : indice d'ouverture, indice de vitrage corrigé et indice de profondeur.

5 Qualité de l'Air Intérieur

5.1 Polluants de l'air intérieur

L'air intérieur, est composé d'un cocktail de polluants complexe à appréhender. De plusieurs centaines à quelques milliers de composés peuvent potentiellement être identifiés, parfois à de très faibles concentrations (Billionnet et al., 2012, Lucattini et al., 2018).

Afin d'en simplifier l'étude, plusieurs classifications peuvent être envisagées. Il est généralement possible de distinguer d'une part les polluants moléculaires, sous forme gazeuse, et d'autre part les particules considérées inertes et celles d'origine biologique (Figure 26). Néanmoins, certains composés organiques, dits semi-volatils (COSV), coexistent sous formes gazeuse et liquide dans les conditions classiques d'un environnement intérieur. Leur condensation sur nucléides au sein du volume d'air entraîne alors la formation d'espèces particulaires. Les mesures des pollutions particulaires et gazeuses font généralement l'objet de technologies différentes, ce qui rend ce type de pollution particulièrement difficile à appréhender.

Par ailleurs, la compréhension des effets d'un polluant, bien que nécessaire, ne suffit pas. En intérieur, nous sommes en effet exposés à un mélange multi-polluants dont les effets peuvent présenter des synergies (Tong et al., 2018) : ceci complexifie d'autant plus la lecture des informations de la QAI et la détermination d'indicateurs fiables et faciles d'accès.

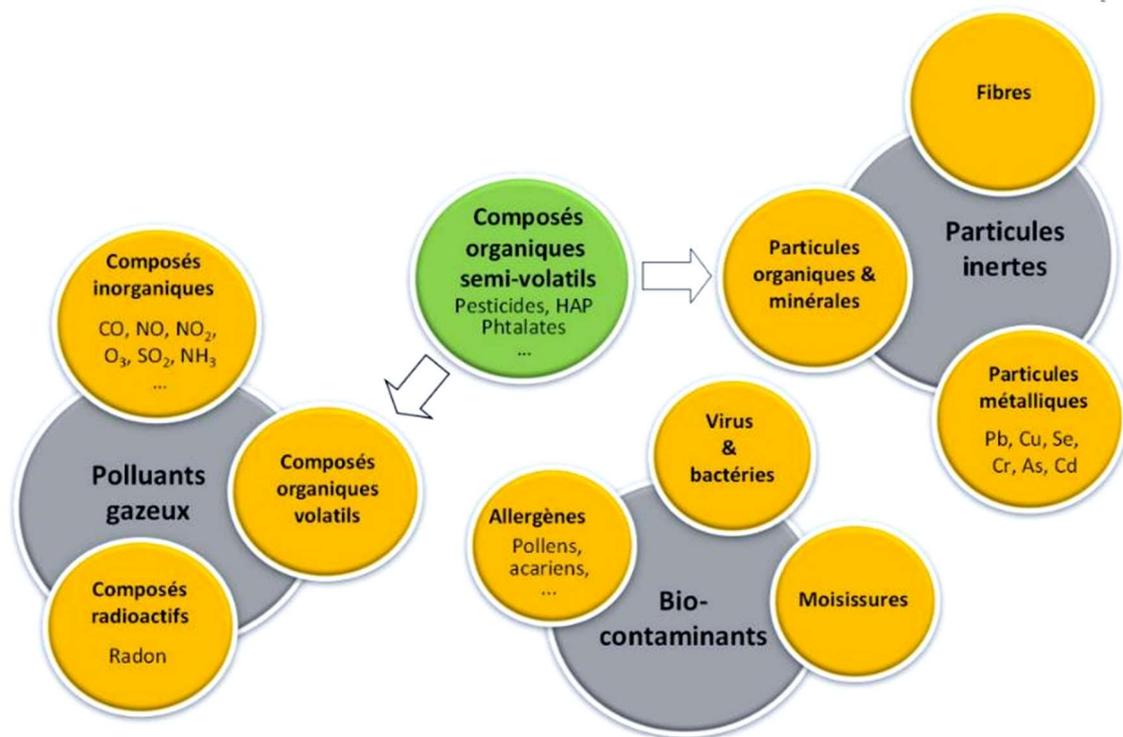


Figure 26 : Classification simplificatrice des polluants intérieurs, d'après (Abadie et al., 2013)

Face à cette diversité, une hiérarchisation des polluants est nécessaire.

5.2 Zoom sur les polluants cibles dans les logements

5.2.1 Hiérarchisation et détermination des polluants cibles

Plusieurs projets ou études ont cherché à déterminer une liste réduite de polluants cibles dont le contrôle est prioritaire. Cette hiérarchisation se base sur des critères de toxicité et est généralement fonction du rapport de leurs concentrations avec leurs limites d'expositions. Le Tableau 8 décrit certaines de ces listes.

Plus récemment, dans le cadre des travaux de l'annexe 68 de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie), un travail de compilation des campagnes de mesures au sein de logements dans dix pays a été réalisé. Ces données ont été utilisées afin de comparer les rapports entre la moyenne annuelle des concentrations de chaque polluant (C_{moy}) et les limites d'expositions à court (VLCT) ou à long termes (VLLT). Les bâtiments à basse consommation ont été distingués au sein de l'étude. Le Tableau 9 liste les seize polluants présentant des risques pour la santé au sein des logements à basse consommation, retenus par cette étude.

La hiérarchisation proposée se base sur un rapport $C_{\text{moy}}/\text{VLLT} > 0,1$ afin de maintenir une marge de sécurité. Il est possible, cependant, d'affiner cette caractérisation des polluants d'intérêt en adoptant un critère plus strict $C_{\text{moy}}/\text{VLLT} > 1$ (Tableau 9). Les COV présentant le risque le plus élevé, selon cette étude, sont alors le formaldéhyde, le benzène, l'acroléine et le trichloréthylène. Plus spécifiquement, dans le cadre des bâtiments les plus récents, à basse énergie, le styrène et dans une moindre mesure l' α -Pinène, ressortent également. Parmi les polluants inorganiques, les pollutions particulières ($\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10}) ainsi que le NO_2 apparaissent comme particulièrement prioritaires.

Tableau 8 : Polluants d'intérêt pour l'étude de la QAI relevés par différents organismes ou études.

Projets ou études	European INDEX project (2005)	World Health Organization (WHO, 2010)	OQAI - France (hiérarchisés par catégories selon des critères de toxicité, de concentrations et de fréquence de présence ; Kirchner et al., 2006)	Lawrence Berkeley National Labs (Logue et al., 2011). Revue littéraire.
COV et COSV	<p><u>Priorité haute</u></p> <p>Benzène Formaldéhyde Naphtalène</p> <p><u>Priorité basse ou données jugées insuffisantes :</u></p> <p>Acétaldéhyde Toluène Xylène Styrène d-limonène α-pinène</p>	<p>Benzène Formaldéhyde Naphtalène PAH* Trichloréthylène Tétrachloroéthylène</p>	<p>Formaldéhyde Benzène Acroléine Benzo[a]pyrène Acétaldéhyde Benzo[a]anthracène Chloroforme Pyrène Tétrachloroéthylène Trichloréthylène Furfural Ethylbenzène Bromoforme Styrène Toluène d-limonène Chlorine PAH*</p>	<p>Acétaldéhyde Acroléine Benzène 1,3-butadiene 1,4-dichlorobenzene Formaldéhyde Naphtalène</p>
Polluants gazeux inorganiques	NO ₂ CO	NO ₂ CO Radon NH ₃	CO NO ₂	NO ₂
Polluants particulaires		PM ₁₀ PM _{2.5}	PM ₁₀ PM _{2.5}	PM _{2.5}

*PAH : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

Tableau 9 : Polluants d'intérêt retenus par l'annexe 68 (Abadie et Wargocki, 2016).

Annexe 68 (AIE) (Abadie et Wargocki, 2016)	
COV et COSV	<p>C_{moy}/VLT>1</p> <p>Acroléine Benzène Formaldéhyde Styrène Trichloréthylène</p> <p>0,1 < C_{moy}/VLT < 1</p> <p>Acétaldéhyde α-Pinène Naphtalène Toluène</p> <p>Autres</p> <p>TCOV (indicateur de la concentration totale en COV)</p>
Polluants gazeux inorganiques	CO ₂ NO ₂ Radon
Polluants particulaires et biologiques	PM ₁₀ PM _{2.5} Moisissures

5.2.2 Brève description des polluants cibles

5.2.2.1 Polluants organiques volatils et semi-volatils

Les COV sont des espèces organiques présentent sous forme gazeuses dans les conditions habituelles terrestres. Ils sont composés de carbone et contiennent un ou plusieurs des éléments suivants : hydrogène, halogènes, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote. La directive européenne 1999/13/CE en donne la définition suivante : « tout composé organique ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa ou plus à une température de 293,15 K ».

Les COSV ont une pression de vapeur inférieure à celle des COV et coexistent sous différentes phases. Ceci leur confère des caractéristiques d'émission très lentes et une forte capacité d'adsorption sur les particules en suspension dans l'air et les matériaux qui délimitent l'ambiance. Des concentrations généralement très faibles compliquent leur étude qui demande des moyens coûteux. Il est de plus difficile d'isoler la part d'exposition due à l'air intérieur et celle des autres voies (ingestion et absorption par la peau).

Ces définitions très larges, basées sur de propriétés physiques, regroupent plusieurs centaines de composés aux propriétés et origines diverses : les phénomènes de combustions liés aux occupants, comme le chauffage, la cuisson ou encore le tabagisme, les équipements électroniques, les produits de nettoyage et aérosols divers comme les parfums d'ambiance ou les déodorants, les matériaux de constructions, etc.

Le nombre, mais aussi la forte variabilité des concentrations dans les environnements intérieurs, rend très difficile l'appréciation de l'impact des composés organiques sur la santé. Parmi les principaux polluants d'intérêt identifiés, il est possible de citer :

- Le formaldéhyde, qui est un aldéhyde léger et volatil. Bien qu'il prenne part naturellement au métabolisme humain, il s'agit d'un des polluants intérieurs les plus étudiés car très fréquemment identifié dans les ambiances intérieures. Sa valeur guide a été récemment modifiée par l'ANSES, passant de 30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ mais il reste un polluant d'intérêt pour ses propriétés irritantes sur les yeux, le nez et la gorge, sa propension à la sensibilisation aux allergènes et un risque de cancérogénicité (Reingruber et Pontel, 2018).
- Le benzène, dont l'exposition peut causer des complications (céphalées, nausées, excitations nerveuses, convulsions) pouvant aller jusqu'au décès. Le CIRC le classe comme cancérogène de groupe 1 et une exposition chronique peut engendrer des complications hématologiques, psychiques et digestives.
- L'acroléine possède principalement des origines intérieures au sein des logements qui sont liées aux combustions de matière organique : cuisson, chauffage au bois, fumée de tabac, bougies, encens, anti-moustique ... L'acroléine est rapidement métabolisée en composés moins toxiques mais a cependant des effets respiratoires et oculaires chroniques selon les concentrations observées. Le CIRC classe ce composé selon le groupe 3 : les données sont jugées insuffisantes pour caractériser son potentiel cancérogène chez l'Homme.
- Les terpènes, qui sont produits par de nombreuses plantes. L' α -pinène est notamment émis par le bois des conifères résineux ou provient de parfums d'ambiance. Ils ont des propriétés allergisantes. En tant que composés insaturés, ils sont susceptibles de réagir en intérieur et former des sous-produits variés.
- Le trichloroéthylène, un solvant chloré pouvant se retrouver dans le caoutchouc, des produits d'entretien, des peintures et vernis, etc. Il est classé cancérogène avéré de groupe 1 par le CIRC. Des sources peuvent persister aux abords de certains site industriel et pressings.

- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), tel que le naphthalène, sont des COSV émis dans les ambiances intérieures par les combustions internes : tabagisme, encens, cuisson des aliments, gaz d'échappement des voitures et certains pesticides (par exemple antimites au naphthalène).

5.2.2.2 Polluants inorganiques

Parmi les principaux composés gazeux inorganiques identifiés, il est possible de citer :

- Les oxydes d'azotes et notamment le dioxyde d'azote (NO₂) et le monoxyde carbone (CO) dont les origines peuvent être extérieures (par exemple trafic routier) ou intérieur (combustions : cigarettes, appareils de chauffage fixes ou d'appoint, encens, activités de cuisine, etc.) ;
- Le dioxyde de carbone (CO₂) émis par la respiration des occupants.

Du point de vue sanitaire, les oxydes d'azote et l'ozone constituent des irritants des voies respiratoires : ils diminuent la fonction respiratoire et aggravent les maladies chroniques telles que l'asthme et les allergies. Le monoxyde de carbone forme un composé stable en se fixant sur l'hémoglobine et peut entraîner une anoxémie (baisse de l'oxygène sanguin) à très faible concentration.

Le CO₂ ne présente pas de risque sanitaire important même si des concentrations élevées présentent un impact sur les performances cognitives des occupants (Allen et al., 2016). Un seuil d'environ 10 000 ppm est nécessaire pour voir apparaître les premiers risques d'acidose respiratoire. Néanmoins, sa concentration étant essentiellement due à la respiration des occupants, il constitue un indicateur du degré de confinement des logements. Le titre III des Règlements sanitaires départementaux (RSD) fixe ainsi, pour les bâtiments non résidentiels, un seuil en CO₂ de 1000 ppm dans des conditions normales d'occupation.

Un autre gaz d'intérêt est le radon, issu de la désintégration de l'uranium et du radium présents naturellement dans le sol et les roches.

Ce gaz inodore, inerte chimiquement, est cependant radioactif et sa présence expose les occupants à des radiations de type alpha. De plus, il forme alors des descendants, eux-mêmes radioactifs, pouvant se fixer sur les aérosols de l'air puis les voies respiratoires, exacerbant leur irradiation. Pour ces raisons, les concentrations en radon sont généralement exprimées, en becquerel par m³ (Bq.m⁻³).

Il constitue, avec l'imagerie médicale, l'une des principales sources d'exposition à la radioactivité et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime que le radon est responsable de 9 à 17% de ces cancers dans les zones à plus forte exposition (100 Bq.m⁻³) (WHO, 2000). Or, une campagne nationale de mesures dans les logements français (1982-2000), par l'Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire (IRSN) a montré que près de 300 000 habitations individuelles présenteraient un niveau d'activité supérieur à 400 Bq.m⁻³. L'exposition est cependant inégale en France et liée aux particularités géologiques locales (comme par exemples les massifs anciens tels que le massif central ou armoricain).

5.2.2.3 Polluants particuliers et biologiques

Les polluants particuliers au sein des logements peuvent provenir de l'extérieur, par le biais de la ventilation mécanique ou naturelle, les infiltrations, ainsi que par des sources intérieures. Parmi ces dernières, il est possible de citer les combustions (chauffage, cuisine, bougies ou encens par exemple), les appareils d'impression, l'utilisation d'aérosols (cosmétiques notamment), l'érosion des matériaux de revêtement, l'utilisation d'humidificateurs ou encore les émissions par les occupants.

Les particules de l'air se déposent sur les parois du système respiratoire principalement par diffusion pour les particules de diamètres inférieurs à 0,1 µm et par sédimentation ou impaction pour celles dont le diamètre est supérieur à 1 µm (Hofmann, 2011 ; Deng et al., 2019). En conséquence,

l'accumulation de deux familles granulométriques de particules est facilitée au niveau des zones d'échanges entre le système respiratoire et le sang : les particules de diamètres d'environ 0,3 µm et celles de diamètres d'environ 3 µm.

Deux indicateurs sont très largement utilisés. Les PM₁₀ regroupent la masse de particules, de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm, par unité de volume, et ainsi pouvant être inhalées.

Les PM_{2,5} regroupent la masse de particules, de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm, par unité de volume, qui pénètre plus facilement les voies respiratoires inférieures.

Ces classes de particules sont les plus étudiées car les plus mesurées, cependant une étude en masse particules par unité de volume rend les particules les plus fines, dont l'impact sur la santé est largement prouvé (Yang et al., 2018), peu visibles.

La capacité de l'organisme à éliminer les particules et leurs effets sur la santé dépendent également de leur nature chimique. Leurs influences sur les maladies pulmonaires, cardio-vasculaires et cérébro-vasculaires ont été montrées. A titre d'illustration, parmi les six polluants étudiés lors de l'étude du coût socioéconomique de la QAI de l'ANSES (ANSES et al., 2014), les particules et la fumée de tabac représentent la très grande majorité (environ 80%) des coûts sociétaux de la QAI (autres polluants de l'étude : benzène, trichloroéthylène, radon et CO).

Parmi les bio-contaminants, les moisissures sont parmi les plus citées. Ce sont des champignons dont certaines espèces trouvent un milieu favorable au sein des bâtiments. Généralement une température comprise entre 10 et 40°C, une humidité élevée et un support nutritif adapté sont nécessaires à leur développement. La contamination par les moisissures peut s'effectuer par la respiration ou par contact direct. Parmi les symptômes, il est possible de citer la gêne et fatigue liées à la réaction du système immunitaire, des risques de sensibilisation ou d'aggravation d'une maladie allergique voire une infection des voies respiratoires, des yeux, des muqueuses ou de la peau.

5.2.2.4 Valeurs guides et limites d'exposition

En France, l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'Environnement et du travail) établit depuis 2004 des Valeurs Guides de qualité d'Air Intérieur (VGAI) (Tableau 10). Ces recommandations ont notamment pu servir de base pour l'élaboration des « valeurs repères d'aide à la gestion » pour les polluants de l'air intérieur par le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP). Cependant ni les valeurs guides de l'ANSES, ni les valeurs repères du HCSP n'ont de caractère réglementaire et seuls le formaldéhyde et le benzène voient leurs seuils fixés par décret (décret 2011-1727).

Au niveau de l'Union Européenne, une liste de LCI (« Lowest Concentration of Interest », « concentration minimale digne d'intérêt ») est élaborée afin de fournir un cadre commun aux états membres pour différentes applications, comme par exemple l'établissement des réglementations sur les émissions des matériaux ou de valeurs guides d'exposition.

A une échelle internationale, lors de l'annexe 68 de l'AIE, un travail de compilation des différentes valeurs limites d'exposition a été effectué pour les polluants cibles (Tableau 11).

Tableau 10 : Valeurs guides pour l'air intérieur proposées par l'ANSES (ANSES, 2018).

Substances	VGAI proposées	
Monoxyde de carbone (CO)	VGAI court terme :	
	- Pour une exposition de 8 heures	10 mg.m ⁻³
	- Pour une exposition d'1 heure	30 mg.m ⁻³
	- Pour une exposition de 30 minutes	60 mg.m ⁻³
	- Pour une exposition de 15 minutes	100 mg.m ⁻³

Benzène	VGAI court terme : pour une exposition de 1 à 14 jours	30 µg.m ⁻³
	VGAI intermédiaire pour une exposition de 14 jours à 1 an	20 µg.m ⁻³
	VGAI long terme : pour une exposition > 1an <i>(pour les effets hématologiques non cancérogènes)</i>	10 µg.m ⁻³
	VGAI long terme pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁶ <i>(pour les effets hématologiques cancérogènes)</i>	0,2 µg.m ⁻³
	VGAI long terme pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁵ <i>(pour les effets hématologiques cancérogènes)</i>	2 µg.m ⁻³
Naphtalène	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	10 µg.m ⁻³
Trichloroéthylène	VGAI intermédiaire pour une exposition de 14 jours à 1 an	800 µg.m ⁻³
	VGAI long terme pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁶	2 µg.m ⁻³
	VGAI long terme pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 ⁻⁵	20 µg.m ⁻³
Tétrachloroéthylène	VGAI court terme : pour une exposition de 1 à 14 jours	1 380 µg.m ⁻³
	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	250 µg.m ⁻³
Dioxyde d'Azote (NO₂)	VGAI court terme : pour une exposition de 2 heures	200 µg.m ⁻³
	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	20 µg.m ⁻³
Acétaldéhyde	VGAI court terme : pour une exposition de 1 heure	3 000 µg.m ⁻³
	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	160 µg.m ⁻³
Acroléine	VGAI court terme : pour une exposition de 1 heure	6,9 µg.m ⁻³
	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	0,8 µg.m ⁻³
Ethylbenzène	VGAI court terme : pour une exposition de 24 heure	22 000 µg.m ⁻³
	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	1500 µg.m ⁻³
Formaldéhyde	VGAI court terme : à respecter de manière répétée et continue pour toute la journée	100 µg.m ⁻³
Toluène	VGAI court terme et long terme	20 000 µg.m ⁻³

Tableau 11 : Liste des valeurs limites d'exposition long et court termes retenues par l'Annexe 68 (Abadie et al., 2017).

	Valeur limite – long terme	Valeur limite – court terme
Acétaldéhyde	48	4600
Acroléine	0,35	6,9
Acrylonitrile	5	-
α-pinène	200	-
Ammoniac	70	3200
Benzène	0,2	110
Dioxyde de carbone	-	1250
Disulfite de carbone	800	6200
Monoxyde de carbone	-	100
Tetrachlorite de carbone	40	1900
Chlorobenzène	1000	-
Chloroforme	300	150
Dichlorométhane	200	-
Ethylbenzène	-	3800
Formaldéhyde	9	123

Methyle ethyle k�tone	-	13000
Naphtalène	2	-
Nitrogène dioxyde	20	470
Ozone	-	180
Pentachloroph�nole	100	-
PM ₁₀	20	50
PM _{2.5}	10	25
Radon	200	400
Styrène	30	21000
Sulfure dioxyde	-	660
Tétrachloroéthylène	100	1380
Toluène	250	37000
Trichloroéthylène	2	-
TVOC	-	600
Chlorure de vinyle	-	180000
Xylène	200	22000

* concentrations en $\mu\text{g.m}^{-3}$ sauf pour le dioxyde de carbone en ppm et le radon en Bq.m^{-3}

5.3 Indices de Qualité de l'Air Intérieur

5.3.1 LHVP

Le Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris (LHVP) a proposé une approche (Castanet, 1998) se basant sur les concentrations en trois polluants, pondérées par des valeurs de références :

$$I_{LHVP} = \frac{[CO]}{5} + \frac{[CO_2]}{1000} + \frac{DTB}{1000} \quad (29)$$

O  :

- $[CO]$ est la concentration en monoxyde de carbone (ppm) et est rapportée à la teneur en CO au seuil de détection de la fumée de tabac ;
- $[CO_2]$ est la concentration en dioxyde de carbone (ppm) et est rapportée à un seuil permettant de juger du confinement des locaux ;
- DTB est le dénombrement total bactérien (UFC.m^{-3}), c'est-à-dire le nombre de bactéries vivantes estimées par comptage des Unités Formant Colonies (UFC), et est rapport  à un seuil de référence.

Cet indice se base sur un nombre réduit de marqueurs et vise à vérifier les bonnes performances des systèmes de ventilation de locaux, principalement vis-à-vis des occupants et de leur confinement (CO_2 , production de fumées de cigarette et bactéries en suspension). Un indice $I_{LHVP} > 3$ est signe d'un système de ventilation ou d'aération mal adapté.

Dans le cadre de logements, l'utilisation de cet indice aurait donc un caractère réducteur.

5.3.2 CLIM 2000

Cet indice a été conçu dans le cadre du logiciel CLIM2000 développé par EDF (Gadeau, 1996).

Il permet de juger de la QAI d'une ambiance en se basant sur la moyenne des concentrations en quatre polluants, pondérées par leurs Valeurs à Risques Limités (VRL) respectives, pour lesquelles une exposition aux polluants a des effets sanitaires jugés faibles à nuls sur des temps courts :

Si : $[CO] < 30$, $[CO_2] < 4500$, $[NO_2] < 0,4$ et $[HCHO] < 0,06$

$$I_{CLIM2000} = \frac{1}{4} \left(\frac{[CO]}{30} + \frac{[CO_2]}{4500} + \frac{[NO_2]}{0,4} + \frac{[HCHO]}{0,06} \right) \quad (30)$$

Sinon :

$$I_{CLIM2000} = \max \left(\frac{[CO]}{30}, \frac{[CO_2]}{4500}, \frac{[NO_2]}{0,4}, \frac{[HCHO]}{0,06} \right) \quad (31)$$

Où :

- $[CO]$ est la concentration en monoxyde de carbone (mg.m^{-3}) ;
- $[CO_2]$ est la concentration en dioxyde de carbone (mg.m^{-3}) ;
- $[NO_2]$ est la concentration en dioxyde d'azote (mg.m^{-3}) ;
- $[HCHO]$ est concentration en formaldéhyde (mg.m^{-3}).

Un indice $I_{CLIM2000} > 1$ montre qu'au moins une des VRL est atteinte ou dépassée. L'air est considéré comme dangereux pour $I_{CLIM2000} > 2$ (la concentration d'au moins un des polluants dépasse le double de sa VLR).

5.3.3 BILGA

Cet indice a été conçu dans le cadre du développement du code de simulation hygrothermique et aéraulique BILGA (Cohas, 1996) issus d'une collaboration entre l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), le Centre d'Etude du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP), Electricité de France (EDF), la Fédération Nationale du Bâtiment (FNB) et Gaz de France (GDF).

Cet indice se base sur deux grandeurs pour chaque polluant P considéré : la Valeurs à Risques Limités (VRL) et la Valeur à Risques Importants (VRI) sur une certaine durée d'exposition T. La formule de calcul de l'indice est la suivante :

$$I_{BILGA} = \begin{cases} \max_P \left(\frac{E_{moy}^P - VRL_T^P}{VRL_T^P} \right) & \text{si } E_{moy}^P \leq VRL_T^P \\ \max_P \left(\frac{E_{moy}^P - VRL_T^P}{VRI_T^P - VRL_T^P} \right) & \text{si } E_{moy}^P > VRL_T^P \end{cases} \quad (32)$$

Où :

- E_{moy}^P est l'exposition moyenne ($\mu\text{g.m}^{-3}$) au polluant P sur la période d'exposition T ;
- VRL_T^P est la valeur à risques limités ($\mu\text{g.m}^{-3}$) du polluant P pour une durée d'exposition T ;
- VRI_T^P est la valeur à risques importants ($\mu\text{g.m}^{-3}$) du polluant P pour une durée d'exposition T.

Tableau 12 : Interprétation de l'indice BILGA

Valeur de l'indice BILGA	Signification	Conclusion sur la QAI
$I_{BILGA} < 0$	Pour chacun des polluants considérés, l'exposition moyenne est inférieure à la VLR.	Excellente
$0 \leq I_{BILGA} < 1$	Pour au moins un des polluants considérés, l'exposition moyenne est comprise entre le VLR et la VLI.	risque sanitaire limité
$1 \leq I_{BILGA}$	Pour au moins un des polluants considérés, l'exposition moyenne est supérieure à la VLI.	risque sanitaire important

5.3.4 GAPI

Cet indice a été conçu pour l'étude de contamination dans des environnements contrôlés de type salles blanches (Cariou et Guillot, 2005).

L'indice propose de sommer les concentrations de plusieurs COV, chacune pondérée par un facteur d'impact dont la détermination dépend des objectifs visés. Dans le cadre d'une étude QAI, une méthode de calcul basée sur les fiches de données de sécurité, facilement accessibles, est proposée et permet la prise en compte d'un grand nombre de composés.

L'indice s'exprime alors :

$$I_{GAPI} = \sum_i W_i C_i \quad (33)$$

Où :

- C_i est la concentration dans l'air ($\mu\text{g.m}^{-3}$) ;
- W_i est le coefficient d'impact du COV i .

Dans le cadre de la QAI, le coefficient d'impact est évalué en fonction de n propriétés du composé i (par exemple l'effet cancérigène, le pouvoir irritant) :

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n X_{i,j}} \quad (34)$$

Où : $X_{i,j}$ traduit l'impact sanitaire du COV.

L'impact sanitaire est déterminé à partir des fiches de données de sécurité en fonction des niveaux de dangerosité ou du nombre de phrases de risques, selon les propriétés évaluées. Cette approche a ainsi l'avantage de permettre l'agrégation de plusieurs types d'effets des polluants considérés mais présente l'inconvénient de complexifier son interprétation.

5.3.5 IAPI

L'indice IAPI (Indoor Air Pollution Index) a été élaboré en 1999 aux Etats-Unis dans le but d'apprécier l'environnement intérieur des bureaux et de faciliter la communication entre occupants et gestionnaires des locaux. Cet indice est calculé à partir de huit polluants de l'air intérieur : le formaldéhyde (HCHO), le total des COV, le monoxyde de carbone (CO), le radon (généralement

remplacé par le dioxyde de carbone - CO₂), deux classes de particules (PM_{2,5} et PM₁₀), les bactéries et les champignons (Sofuoglu et Moschandreas, 2003).

Contrairement aux indices précédemment décrits, celui-ci présente la particularité de se baser sur une campagne de mesures de concentrations en polluants et des enquêtes sanitaires réalisées dans 100 immeubles de bureaux répartis sur l'ensemble du territoire américain (étude BASE : Building Assessment Survey and Evaluation, menée par l'US-EPA dans les années 1990), permettant une comparaison des résultats avec une base de données de logements.

L'indice fournit une méthode d'agrégation de notes pour chacun des polluants considérés en plusieurs niveaux :

$$IAPI = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K N_{i,j,k} \quad (35)$$

Avec $N_{i,j,k}$ une note sur 10 (plus cette note est faible, meilleure est la QAI) :

si $C_{i,j,k}^{obs} < C_{i,j,k}^{max}$ et $C_{i,j,k}^{min} < C_{i,j,k}^{obs} < C_{i,j,k}^{dmc}$

$$N_{i,j,k} = 10 \left[1 - \frac{C_{i,j,k}^{max} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{max} - C_{i,j,k}^{min}} \left(\frac{C_{i,j,k}^{dmc} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{dmc}} \right) \right] \quad (36)$$

si $C_{i,j,k}^{dmc} < C_{i,j,k}^{obs} \leq C_{i,j,k}^{max}$

$$N_{i,j,k} = 10 \left[1 - \frac{C_{i,j,k}^{max} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{max} - C_{i,j,k}^{min}} \right] \quad (37)$$

si $C_{i,j,k}^{obs} > C_{i,j,k}^{max}$

$$N_{i,j,k} = 10 \quad (38)$$

Où :

- I : nombre de groupes au niveau 3 ;
- J : nombre de groupes de niveau 2 dans chaque groupe de niveau 3 ;
- K : nombre de polluants de niveau 1 dans chaque groupe de niveau 2 ;
- C^{max} : concentrations maximales issues de l'étude BASE ;

- C^{min} : concentrations minimales issues de l'étude BASE ;
- C^{obs} : concentrations mesurées dans le bâtiment étudié ;
- C^{dmc} : valeurs limites d'exposition ou valeurs guides (*demarcation concentrations*) ;
- $C_{i,j,k}$: concentrations du polluant k appartenant au sous-groupe j (niveau 2) du groupe i (niveau 3).

Par ailleurs, si la concentration mesurée d'un polluant est inférieure à la concentration minimale mesurée dans le cadre de l'étude BASE ($C_{i,j,k}^{obs} < C_{i,j,k}^{min}$), l'indice IAPI doit être calculé en prenant $C_{i,j,k}^{obs} = C_{i,j,k}^{min}$.

La note de chaque niveau est constituée par la moyenne arithmétique des notes du niveau inférieur (Figure 27).

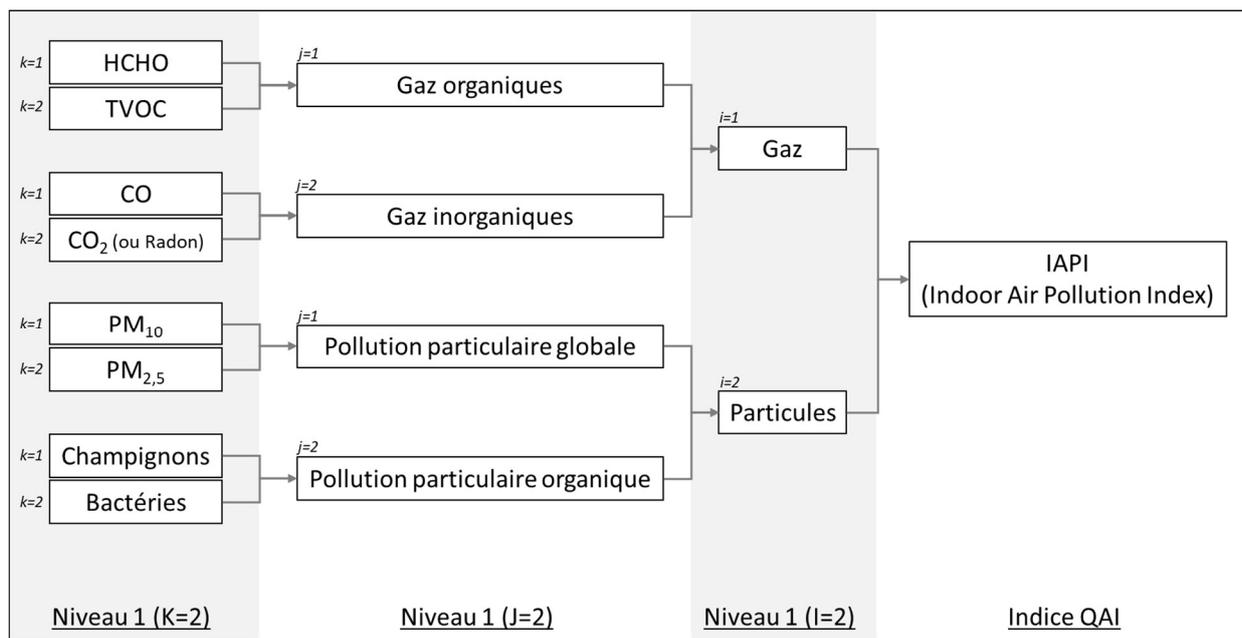


Figure 27 : Description des différents niveaux de l'indice IAPI.

5.3.6 QUAD-BBC

Cet indice, proposé dans le cadre du projet QUAD-BBC (2012), a pour expression générale :

$$I_{QAI} = \sum_{p=1}^{Np} \left(\frac{C_p}{C_{lim,p}} \right) \quad (39)$$

Où :

- C_p est la concentration du polluant ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) ;
- $C_{lim,p}$ est la valeur limite de référence considérée pour les polluant ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Le projet QUAD-BBC (2012) propose différentes combinaisons selon les locaux concernés. Par exemple, pour un habitat :

$$I_{QAI,habitat} = \frac{C_{H_2O}}{C_{lim,H_2O}} + \frac{C_{CO_2}}{C_{lim,CO_2}} + \frac{C_{HCHO}}{C_{lim,HCHO}} + \frac{C_{PM2.5}}{C_{lim,PM2.5}} + \frac{C_{Radon}}{C_{lim,Radon}}$$

Si cet indice permet la somme d'une grande variété de polluants, il agrège les données de composés aux effets très différents. C'est pourquoi il est proposé d'afficher des indices intermédiaires par catégories de polluants, qui possèdent des effets similaires ou sont des marqueurs de comportements semblables (Tableau 13). La figure 3 reprend un exemple de représentation utilisée dans le cadre du projet QUAD-BBC (2012) afin d'en démontrer l'intérêt dans le cadre de l'étude de différentes configurations de cuisines (Figure 28).

Tableau 13 : Descriptions des différentes catégories établies lors du projet QUAD-BBC (2012).

CATEGORIES	A	B	C	D
DESCRIPTION	Marqueur de l'occupation et du confinement d'un local	Polluants liés à certaines activités des occupants comme par exemple la cuisson	Substances dont le choix dépend des sources potentielles (activités, comportements et matériaux)	Pollutions particulaires
POLLUANTS	- CO ₂	- NO ₂ (logements) - SO ₂ - O ₃ (bureaux)	- CO - Formaldéhyde - Acétaldéhyde - Ethylbenzène - Styrène - Toluène - o-Xylène - Acétone	- PM ₁₀ - PM _{2.5}

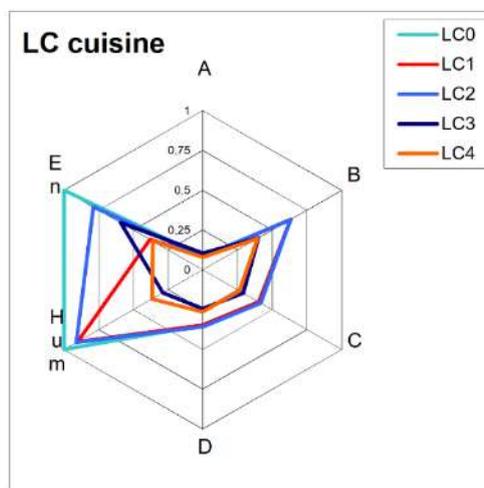


Figure 28 : Exemple de radar multicritère proposé par le projet QUAD-BBC (2012). Les configurations LC3 et LC4 correspondent à des cuisines équipées de hottes double flux, contrairement aux configurations LC0, LC1 et LC2. Les catégories A, B, C et D correspondent à l'indice QAI, comme décrit précédemment.

5.3.7 EVCI/DALE/DALY

L'espérance de vie corrigée de l'incapacité (EVCI) ou « Disability adjusted life Expectancy » (DALE), en anglais, est un mode d'évaluation du coût de l'exposition à des polluants. Il consiste à soustraire à l'espérance de vie, le nombre d'années « perdues » à cause de la maladie, du handicap ou d'une mort précoce.

Le nombre d'années « perdues », ou DALY (pour Disability Adjusted Life Years), peut également être utilisé seul, ce qui facilite l'utilisation de l'indicateur et sa comparaison à l'international. Il s'agit alors d'une mesure de la charge de morbidité globale.

Celui-ci consiste en la somme des années vécues avec un handicap ($YLD_{disease}$), pondérées entre 0 et 1 selon la gravité du handicap, et celles dues à une mort précoce ($YLL_{disease}$) :

$$DALY_{disease} = YLL_{disease} + YLD_{disease} \quad (40)$$

Deux approches sont proposées (Logue et al., 2011) pour calculer le DALY :

- IND (Intake-Incidence-Daly) : cette méthode se base sur le taux d'incidence de maladies et sur des données de la littérature sur les pertes d'années associées ;
- ID (Intake Daly) : cette méthode estime l'impact sur la santé des polluants en se basant sur des données toxicologiques animales extrapolées à l'homme.

5.3.7.1 Approche « IND »

L'incidence (INC) de la maladie est calculée par une application de la fonction dose-réponse suivante.

$$INC = Pop \times y_0 \times (1 - e^{-\beta \times C_{exp}}) \quad (1)$$

Où :

- Pop est la population exposée ;
- y_0 est niveau de prévalence de la maladie par an (-) ;
- β est le coefficient de changement de concentration (logarithme du risque relatif divisé par la variation de l'exposition moyenne ou médiane) ;
- C_{exp} est la concentration d'exposition ($\mu\text{g.m}^{-3}$).

Le DALY peut alors s'exprimer en fonction de la perte d'année par incidence ($\frac{\partial DALY}{\partial INC}$) et de l'incidence :

$$DALY = \frac{\partial DALY}{\partial INC} \times INC \quad (2)$$

Le Tableau 14 récapitule les valeurs de ces coefficients pour cinq polluants.

Tableau 14 : Coefficients permettant le calcul du DALY selon l'approche « IND », pour cinq polluants (Logue et al., 2011)

Pollutant	Outcome	β -Coefficient (95% CI)	γ_0	DALYs lost per incidence (95% CI)
PM _{2.5}	Total mortality (Pope et al. 2002)	0.058 (0.002, 0.010)	7.4×10^{-3}	1.4 (0.14, 14) (Pope 2007; Pope et al. 2002, 2009)
	Chronic bronchitis (Abbey et al. 1995)	0.091 (0.078, 0.105)	0.4×10^{-3}	1.2 (0.12, 12) (Lvovsky et al. 2000; Melse et al. 2010)
	Nonfatal stroke (Brook et al. 2010)	0.025 (0.002, 0.048)	0.2×10^{-3}	0 complications: 9.5 (9.25, 9.75) 1 complication: 11.7 (11.1, 12.4) > 1 complication: 13.1 (12.2, 14.0) (Hong et al. 2010)
CO	Hospital admissions (Burnett et al. 1999)			4×10^{-4} (Lvovsky et al. 2000)
	Asthma	0.033 (0.016, 0.050)	1.8×10^{-3}	
	Lung disease	0.025 (0.000, 0.057)	2.1×10^{-3}	
	Dysrhythmias	0.058 (0.012, 0.102)	2.4×10^{-3}	
NO ₂	Hospital admissions (Burnett et al. 1999)			4×10^{-4} (Lvovsky et al. 2000)
	Respiratory issues	0.004 (0.000, 0.008)	9.5×10^{-3}	
	Congestive heart failure	0.003 (0.001, 0.004)	3.4×10^{-3}	
	Ischemic heart disease	0.003 (0.002, 0.004)	8.0×10^{-3}	
	Respiratory illness, indicated by symptoms (Hasselblad et al. 1992)	0.028 (0.002, 0.053)	N/A	4×10^{-4} (Lvovsky et al. 2000)
Ozone	Mortality (Jerrett et al. 2010; Samet et al. 1997)	0.001 (0.000, 0.002)	7.7×10^{-3}	1.0 (0.1, 10) (Lewy et al. 2001; Lvovsky et al. 2000)
	Hospital admissions (Burnett et al. 1999)			4×10^{-4} (Lvovsky et al. 2000)
	Asthma	0.003 (0.001, 0.004)	1.8×10^{-3}	
	Lung disease	0.003 (0.001, 0.005)	2.1×10^{-3}	
	Respiratory infection	0.002 (0.001, 0.003)	5.8×10^{-3}	
	Dysrhythmias	0.002 (0.000, 0.004)	2.4×10^{-3}	
SO ₂	Hospital admissions (Burnett et al. 1999)	0.002 (0.000, 0.003)	8.0×10^{-3}	4×10^{-4} (Lvovsky et al. 2000)

1.1.1.1.1 Approche « ID »

Contrairement à l'approche précédente, le DALY est ici calculé à partir de données toxicologiques en fonction de la dose inhalée par une personne sur une période donnée (*DOSE*) :

$$DALYs = \frac{\partial DALY}{\partial DOSE} \times DOSE \quad (3)$$

Cette expression peut être divisée en deux catégories pour distinguer les effets cancérigènes et non cancérigènes.

5.3.8 IQAI

Cet indice a été proposé avec l'établissement du Diagnostic de Performance Énergétique des bâtiments en 2006 par le Portugal afin de rendre obligatoire la surveillance de la QAI dans les bâtiments existants par vérification des niveaux de concentrations en particules, monoxyde et dioxyde de carbone, ozone, formaldéhyde, COV totaux, microorganismes (bactéries et champignons) ainsi des légionnelles et du radon si nécessaires.

Les Figure 29 et Figure 30 décrivent la forme adoptée par cet indice. Pour chaque polluant surveillé, différents seuils sont établis afin de définir des classes décrivant un air allant de très bon à très mauvais.



13. CONCENTRAÇÕES DOS PRINCIPAIS POLUENTES NO AR INTERIOR (MEDIDOS EM AUDITORIA)

Descrição sucinta da metodologia utilizada, observações, resultados e conclusões	Data da auditoria
--	-------------------

•

Valores verificados em auditoria para os principais parâmetros e poluentes	Concentração Medida	Concentração máxima De referência
Partículas suspensas no ar com diâmetro inferior a 10 microns (PM ₁₀)	mg/m ³	0,15 mg/m ³
Dióxido de carbono	mg/m ³	1800 mg/m ³
Monóxido de carbono	mg/m ³	12,5 mg/m ³
Ozono	mg/m ³	0,2 mg/m ³
Formaldeído	mg/m ³	0,1 mg/m ³
Compostos Orgânicos Voláteis Totais	mg/m ³	0,6 mg/m ³
Microrganismos – bactérias	UFC/m ³	500 UFC/m ³
Microrganismos – fungos	UFC/m ³	500 UFC/m ³
<i>Legionella</i>	UFC/l	100 UFC/l
Radão	Bq/m ³	400 Bq/m ³

Sugestões de medidas de melhoria associadas

Proposta n _____

Figure 29 : Extrait du certificat énergétique et de qualité de l'air du Portugal.

Classe	PM ₁₀ (µg.m ⁻³)		PM _{2,5} (µg.m ⁻³)		COVT (µg.m ⁻³)		NO ₂ (µg.m ⁻³)		CO (µg.m ⁻³)		HCHO (µg.m ⁻³)		CO ₂ (mg.m ⁻³)		Microbiologie (UFC.m ⁻³)				Radon (Bq.m ⁻³)	
															Bactéries		Moississures			
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Très bon	-	<30	-	<15	-	<400	-	<40	-	<3	-	<50	-	<1600	-	<50	-	<50	-	<200
Bon	31	50	16	25	401	600	41	60	3,1	5	51	75	1601	2250	51	100	51	100	201	300
Moyen	51	100	26	50	601	1200	61	120	5,1	10	76	100	2251	2880	101	500	101	500	301	400
Mauvais	101	150	51	75	1201	1500	121	150	10,1	13	101	130	2881	3600	501	750	501	750	401	600
Très mauvais	>151	-	>76	-	>1501	-	>151	-	>13	-	>131	-	>3601	-	>751	-	>751	-	>601	-

Figure 30 : Proposition de détermination de l'indice IQAI.

5.3.9 Indice et critère du Club Ventilation animé par le CEREMA

Le groupe de travail du Club Ventilation animé par le CEREMA : « Critères d'équivalence des systèmes modulant le renouvellement d'air » (CEREMA, 2018), définit deux critères pour vérifier que la performance attendue d'un système de ventilation modulé est atteinte. Les objectifs d'un tel indice diffèrent donc de ceux de ce livrable. Il offre cependant une vision différente de la lecture de résultats de simulation ou de modélisation, qui peut être applicable à une comparaison avant et après rénovation. L'intérêt d'une telle approche pourra alors être discuté, si celle-ci est pertinente.

5.3.9.1 Critère sur le CO₂

La différence entre la concentration de CO₂ intérieure et celle extérieure est considérée comme un marqueur des bio-effluents, c'est-à-dire des polluants intérieurs émis par les occupants.

Pour chaque pièce de vie (séjour et chambres), le système à qualifier doit produire une exposition cumulée au CO₂ inférieure à celle produite par le système de référence pour tout seuil de concentration au-delà de C_{ext} (concentration extérieure) + 400ppm.

Ceci revient à la vérification de la relation suivante :

Pour tout seuil $S \geq 400\text{ppm}$,

$$\left(\sum_{i \text{ tel que } \Delta C_{CO_2_i} > S} \Delta C_{CO_2_i} h_i \right)_{\text{système évalué}} \leq \left(\sum_{i \text{ tel que } \Delta C_{CO_2_i} > S} \Delta C_{CO_2_i} h_i \right)_{\text{référence}} \quad (41)$$

Où :

- i représente l'indice du pas de temps horaire h_i ;
- $\Delta C_{CO_2_i} = C_{CO_2_{\text{intérieur}}} - C_{CO_2_{\text{extérieur}}}$ au pas de temps i .

La Figure 31 illustre ce principe pour un système à qualifier valide et un système invalide.

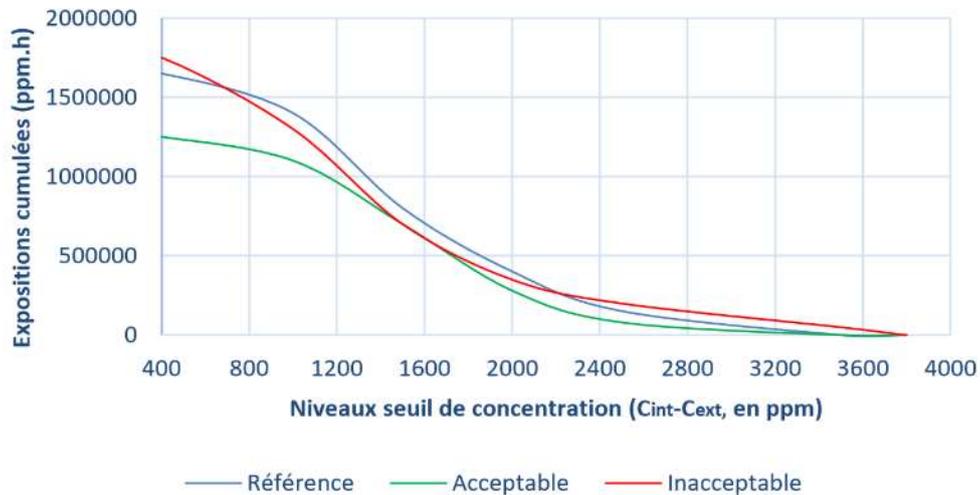


Figure 31 : Illustration du critère CO₂, les courbes en vert et en rouge constituent deux illustrations de résultats pour un système à qualifier, respectivement un système valide et un système invalide. La courbe en bleu représente le système de référence dans la même pièce (CEREMA, 2018).

5.3.9.2 Critère sur l'humidité relative

Le niveau d'humidité relative dans chacune des pièces est utilisé comme marqueur du risque de condensation et du risque direct et indirect (comme par exemple le développement de moisissure) sur la santé.

Pour être qualifié, un système doit produire un pourcentage de temps cumulé de dépassement des niveaux d'humidité relative inférieur à celui produit par le système de référence, et ce pour tout seuil de niveau d'humidité relative supérieur à 60% (Figure 32).

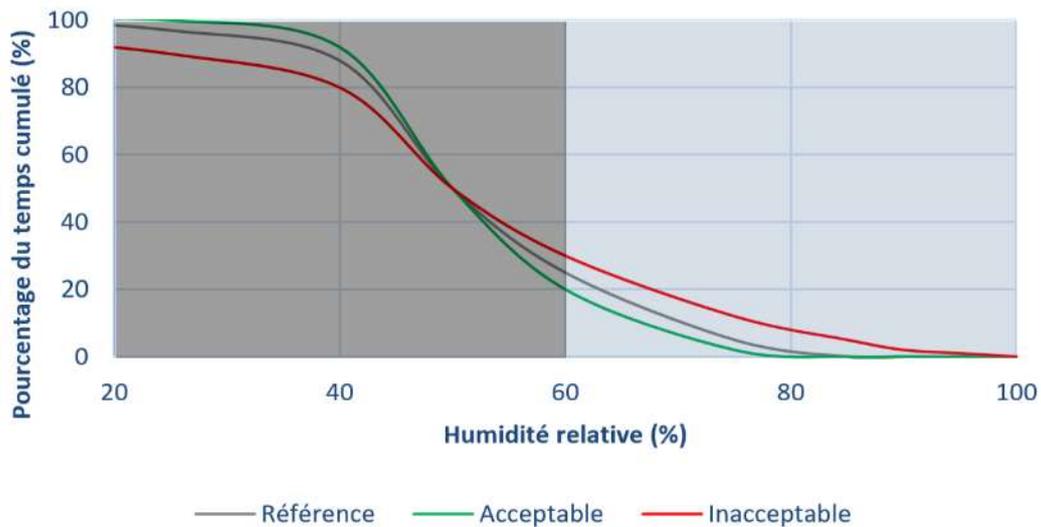


Figure 32 : : Illustration du critère humidité relative, les courbes en vert et en rouge constituent deux illustrations de résultats pour un système à qualifier, respectivement un système valide et un système invalide. La courbe en bleu représente le système de référence dans la même pièce (CEREMA, 2018).

5.3.10 ICONE

Cet indice, crée pour l'évaluation du confinement au sein des écoles, peut être appliqué aux logements avec la même formulation (Ribéron et al., 2016).

L'indice ICONE est basé sur la concentration en CO₂ et prend en compte à la fois la fréquence des situations de confinement et leur intensité en proposant trois classes de concentration : la classe 0 concerne les concentrations comprises entre 0 et 1000 ppm, la classe 1 celles entre 1000 et 1700 ppm et la classe 2 celles supérieures à 1700 ppm.

La formule de cet indice, faite pour varier entre 0 (confinement nul) et 5 (confinement extrême) est la suivante :

$$N = 8,3 \log(1 + f_1 + 3 f_2) \quad (42)$$

Où : f_i sont les proportions de valeurs de CO₂ en chacune des trois classes ($f_0 + f_1 + f_2 = 1$).

Le Tableau 15 donne la correspondance entre état du confinement et valeur de l'indice ICONE.

Tableau 15 : Correspondance entre état du confinement et valeur de l'indice ICONE.

ICONE	État du confinement
0	Confinement nul
1	Confinement faible
2	Confinement moyen
3	Confinement élevé
4	Confinement très élevé

5.3.11 ULR-QAI

Cet indice a été développé au sein de l'université de la Rochelle, dans le cadre du travail de doctorat de Cony (2020).

Le calcul n'impose pas le nombre et la nature des polluants utilisés. Pour le calcul de cet indice, il est cependant recommandé de se baser au moins sur le formaldéhyde, l'acroléine, le benzène, les PM₁₀, les PM_{2.5} et le monoxyde de carbone.

La formule pour chaque sous-indice, représentant un polluant, $I_{ULR-QAI,i}$, est la suivante :

$$I_{ULR-QAI,i} = 10 \times \frac{C_{int,i} - VGAI_{LT,i}}{VGAI_{CT,i} - VGAI_{LT,i}} \quad (4)$$

Où : $C_{int,i}$ est l'exposition moyenne annuelle des occupants au polluant i ;
 $VGAI_{LT,i}$ est la VGAI à long terme du polluant i et $VGAI_{CT,i}$ est la VGAI à court terme du polluant i .

Afin de borner l'indice sur une échelle de 0 à 10, les deux conditions suivantes sont appliquées :

- Si $C_{int,i} < VGAI_{LT,i}$ alors $I_{ULR-QAI,i} = 0$, et
- Si $C_{int,i} > VGAI_{CT,i}$ alors $I_{ULR-QAI,i} = 10$.

Le calcul de l'indice global est la valeur maximale des sous-indices, soit :

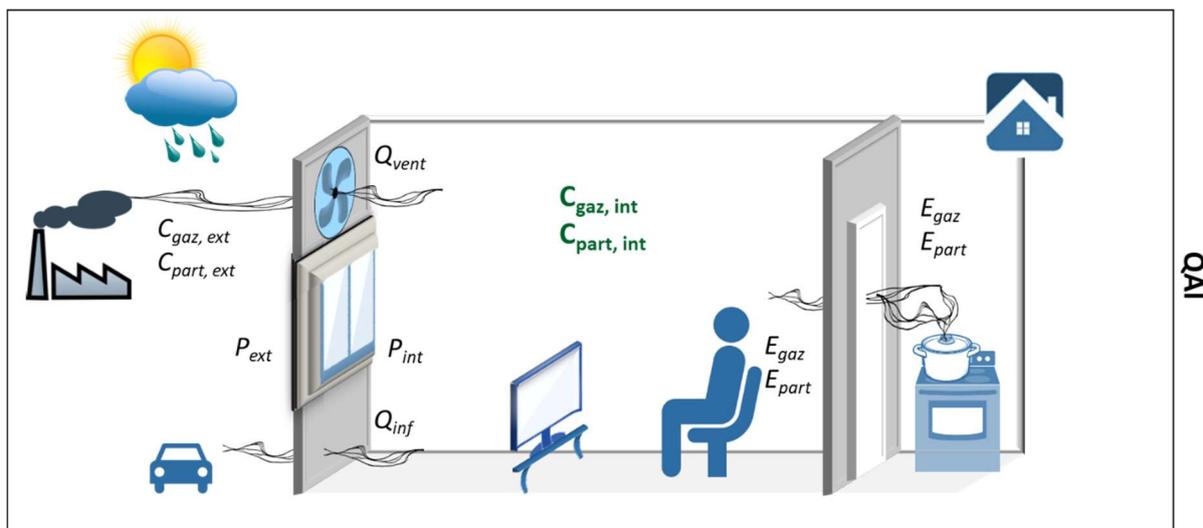
$$I_{ULR-QAI} = \max(I_{ULR-QAI,1}; I_{ULR-QAI,2}, \dots, I_{ULR-QAI,n}) \quad (5)$$

où n est le nombre total de polluants considérés.

5.4 Synthèse

La Figure 33 illustre les différents prérequis, notamment en modélisation, nécessaires pour la détermination des indices de QAI cités précédemment. Ils concernent :

- Les fichiers météo et les concentrations extérieures ;
- L'enveloppe du bâtiment via les infiltrations ;
- La ventilation ;
- Les émissions internes des matériaux, notamment surfaciques, et l'activité des occupants ;
- Les interactions avec les parois.



Q_{vent} : débit d'air de ventilation ($m^3.s^{-1}$), Q_{inf} : débit d'air d'infiltration ($m^3.s^{-1}$), P_{int} : pression intérieure et P_{ext} : pression extérieure (Pa), C_{gaz} : concentrations des polluants gazeux ($kg.m^{-3}$), C_{part} : concentrations des polluants particulaires ($kg.m^{-3}$), E : taux d'émissions de polluants ($kg.s^{-1}$).

Figure 33 : Vue schématique des variables utiles à la définition des indices de QAI (vert) et des autres variables les influençant.

De l'étude bibliographique présentée 5.2, il ressort que la prise en compte des COV suivants présentent un intérêt majeur pour les logements : le formaldéhyde, le benzène, l'acroléine et le trichloréthylène.

Parmi ces polluants, l'étude du formaldéhyde et du benzène semblent particulièrement intéressantes. En effet, le premier est un polluant émis principalement par les surfaces intérieures, généralement très impactées par les actes de rénovation. Le second est un polluant aux origines principalement extérieures, dont les concentrations intérieures seront impactées par les travaux influençant les infiltrations d'air ou la ventilation.

Les sources d'acroléine au sein des logements sont principalement dues à l'activité des occupants (combustions de matières organiques) : cuisson, chauffage au bois, fumée de tabac, bougies, encens, anti-moustique, etc. Mis à part le cas d'un chauffage au bois, les émissions intérieures de ce polluant ne seront pas impactées par les actes de rénovation classiques envisagés.

Dans le cadre particulier des logements récents à basse énergie, l'étude du styrène et, dans une moindre mesure, de l' α -Pinène, peut également être envisagée.

Du fait des particularités du Radon vis-à-vis de ses émissions à partir de certaines formations géologiques, une étude spécifique peut se révéler pertinente afin de caractériser ou estimer l'impact possible de certains actes de rénovation. En effet, un changement de ventilation ou de perméabilité à l'air de l'enveloppe, par exemple, pourrait exacerber un effet de tirage, depuis le sol, par création ou augmentation d'une dépression au sein du logement.

Le Tableau 16 récapitule les indicateurs de QAI décrits précédemment. La plupart de ces indicateurs sont calculable à partir d'un nombre réduit de polluants et les choix précédent sont peu impactant sur leur utilisation. L'impact de ces choix est cependant visible sur ce tableau et certains indicateurs sont impactés, tel que par exemple le LHVP qui prévoit normalement un dénombrement bactérien.

Tableau 16 : Tableau récapitulatif des indicateurs de QAI décrits et des principaux paramètres et variables spécifiques à ces indicateurs. Un « o » signifie que la variable est facultative pour le calcul de l'indicateur. Les variables en rouges sont les variables citées précédemment mais dont la prise en compte dans ce projet n'est pas prévue, leur présence permet cependant d'évaluer l'impact de leur absence sur le calcul de certains indicateurs.

Variables (en gras) ou paramètres spécifiques x pour obligatoire, o pour facultatif pour le calcul de l'indicateur associé	Indicateurs décrits										
	LHVP	Clim 2000	BILGA	GAPI	IAP1	QUAD-BBC	DALY	IQAI	ICONE	ULR-QAI	IADI
[CO] concentration en monoxyde de carbone (ppm)	x	x	o	o	o		o	x		o	
[CO₂] concentration en dioxyde de carbone (ppm)	x	x	o	o	o	x	o	x	x	o	
DTB dénombrement total bactérien (UFC/m³)	x				o		o	x			
Moisissures					o		o	x			
[NO₂] concentration en dioxyde d'azote (mg/m³)		x	o	o	o		o	x		o	
[HCHO] concentration en formaldéhyde (mg/m³)		x	o	o	o	x/o	o	x		o	
[C₇H₈] concentration en Toluène (mg/m³)			o	o	o		o			o	
[C₆H₆] concentration en Benzène (mg/m³)			o	o	o		o			o	
TVOC					o			x			
Concentration en Acroléine (mg/m³)			o	o	o		o			o	
Concentration en PM_{2,5} (mg/m³)					o	x	o			o	
Concentration en PM₁₀ (mg/m³)					o						
Radon			o			x	o	x		o	
Humidité relative						x					
Valeurs à Risques Limités (VRL)			x								

la Valeur à Risques Importants (VRI)			x								
W_i est le coefficient d'impact du COV i (FDS)				x							
Concentrations minimales et maximales issues de l'étude BASE ou de l'étude de référence choisie					x						
Pop la population exposée							x				
y_0 niveau de prévalence de la maladie par an (-)							x				
β est le coefficient de changement de concentration							x				
VGAI à court et long terme										x	

6 Environnement électromagnétique

6.1 Définitions et sources

Les champs magnétiques se manifestent par l'existence d'une force agissant sur les charges en mouvement. Leur intensité peut être caractérisée en tesla (T, densité de flux magnétique) ou en ampères par mètre ($A.m^{-1}$, Intensité de champ magnétique).

Les champs électriques influencent également les charges fixes et leur intensité s'exprime en volt par mètre ($V.m^{-1}$).

Les champs électromagnétiques non statiques sont également caractérisés par leur fréquence (Hz).

Ces champs sont produits par des conducteurs parcourus par un courants et il existe donc de nombreuses sources d'origines anthropiques, volontaires ou non, pouvant influencer l'exposition au sein des logements :

- Basses fréquences (0 à 10 kHz) : lignes électriques, alimentation des trains, métros ou tramway, électroménager, écrans d'ordinateurs, etc. ;
- Fréquence radio (10 kHz à 10 MHz) : écrans d'ordinateurs, fours à induction, radio AM ;
- Hautes fréquences (10 MHz à 10 GHz) : VHF/TV, radios FM, IRM-RMN, chauffage diélectrique, IHF/TV, téléphone cellulaire ;
- Micro-ondes (10 GHz à 5 THz) : fours micro-ondes, radars, satellites, four industriels micro-ondes.

Au-delà de ces fréquences, on retrouve les infra-rouges, les rayonnements du spectre visible, les ultraviolets ainsi que les rayonnements ionisants, c'est-à-dire susceptible d'interagir avec les liaisons covalentes des molécules (rayons X et Gamma : 30 PHz à 300 EHz), exclus de cette étude.

Parmi ces sources, certaines sont donc extérieures aux logements :

- lignes de transport et de distribution d'électricité (émissions d'ondes basses fréquences liées à la circulation du courant) ;
- antennes des stations de radiodiffusion (radio et télévision : ondes radio hautes fréquences) ;
- stations relais de téléphonie mobile.). Elles émettent un faisceau étroit d'ondes radioélectriques (hautes fréquences) se propageant majoritairement parallèlement au sol. ;
- installations radars (cas particuliers, généralement à distance des habitations).

D'autres sources sont intérieures aux logements, du fait de l'utilisation d'appareils ménagers électriques (basse fréquence) ou à l'usage de téléphones portables (haute fréquences) dont les émissions dépassent largement l'exposition de fond aux radiofréquences.

6.2 Les effets sur la santé

6.2.1 Effets à court termes

Aux fréquences radio ou à plus hautes fréquences (au-dessus de 10-100 kHz, comme par exemple les ondes émises par les téléphones portables) : le champ électrique ne pénètre que faiblement à l'intérieur du corps humain du fait de son interaction avec l'agitation de certaines molécules (notamment l'eau pour le cas des micro-ondes). Il s'ensuit notamment un échauffement de la zone impactée. L'effet sur la santé est alors principalement thermique. L'indicateur généralement utilisé est le débit d'absorption spécifique (DAS) au sein des tissus biologiques. Il s'exprime en watts par kilogramme ($W.kg^{-1}$). Le DAS est la grandeur dosimétrique couramment adoptée pour les fréquences supérieures à 100 kHz dans les textes réglementaires.

Par ailleurs, les champs magnétiques peuvent entraîner un courant électrique susceptible de stimuler les nerfs et les muscles. La densité de courant induit en ampère par mètre carré ($A.m^{-2}$) est alors la grandeur dosimétrique couramment utilisée pour évaluer cet effet. Les premiers effets visuels et nerveux, ainsi que sur les os, se manifestent dès $10 mA.m^{-2}$. A partir de $1000 mA.m^{-2}$, il existe des risques cardiaques (fibrillation).

Les champs électriques, notamment statiques ou de basse fréquence, influencent la distribution des charges à la surface des tissus conducteur du corps. Ils peuvent ainsi provoquer des réactions cutanées. Le seuil de perception est d'environ $10 kV.m^{-1}$.

Ainsi, il est généralement distingué deux types d'effets concernant deux catégories de fréquences : les effets thermiques à haute fréquences (>100 kHz) et les effets électriques pour les basses fréquences ou les champs statiques.

La Figure 34 et la Figure 35 illustrent les niveaux de références pour l'exposition à des champs électromagnétiques, selon les recommandations de l'ICNIRP pour la population générale et les travailleurs.

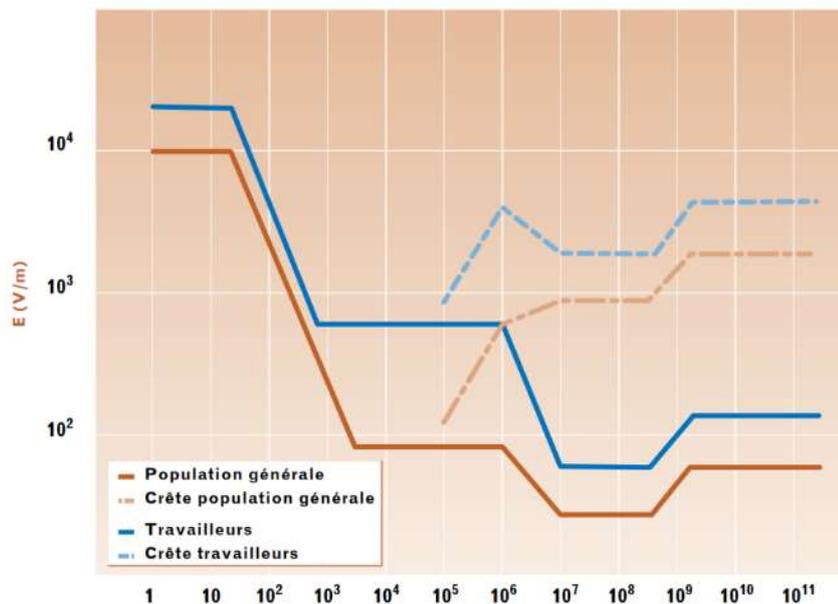


Figure 34 : niveaux de référence pour l'exposition à des champs électriques variables dans le temps (INRS 2001, d'après les valeurs guides de l'ICNIRP)

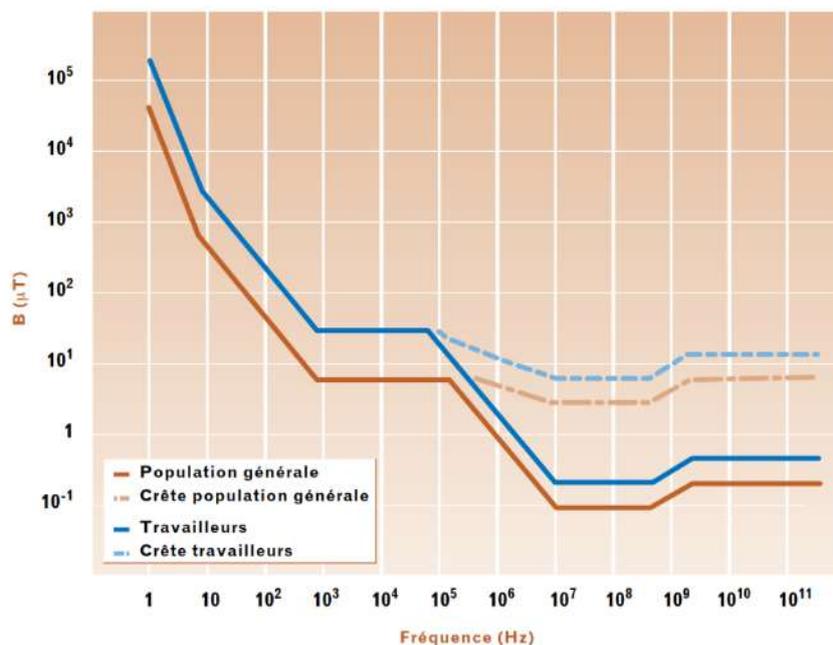


Figure 35 : niveaux de référence pour l'exposition à des champs magnétiques variables dans le temps (INRS 2001, d'après les valeurs guides de l'ICNIRP)

6.2.2 Effets à long termes

Le CIRC a classé les champs électromagnétiques très basses fréquences (inférieur à 100 kHz) comme « peut-être cancérigènes pour l'homme » (groupe 2B) sur la base de plusieurs études épidémiologiques mettant en évidence un risque accru de leucémie chez des enfants vivant à proximité de lignes à haute tension.

En 2011, le CIRC a également classé les champs électromagnétiques radiofréquences comme « peut-être cancérigènes pour l'homme » (groupe 2B). Ce classement a été établi suite à quelques études

épidémiologiques, sur la base d'un risque accru de gliome (un type de cancer malin du cerveau) associé à l'utilisation de téléphone sans fil (INRS 2001).

Cependant, les effets sur le long terme d'une faible exposition font toujours l'objet de débats.

6.3 Les textes de référence

6.3.1 Décret n°2002-775

En France, le principal texte de référence est le décret n°2002-775 qui décrit les valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunications ou par les installations radioélectriques. Il reprend les valeurs fournies par l'ICNIRP (Figure 36 et Figure 37). Il découle de la recommandation européenne pour le public (1999/519/CE).

GAMME DES FRÉQUENCES	INDUCTION magnétique (mT)	DENSITÉ de courant S (mA/m ²) (valeur efficace)	MOYENNE DAS pour l'ensemble du corps (W/kg)	DAS localisé (tête et tronc) (W/kg)	DAS localisé (membres) (W/kg)	DENSITÉ de puissance S (W/m ²)
0 Hz	40	-	-	-	-	-
> 0-1 Hz	-	8	-	-	-	-
1-4 Hz	-	8/f	-	-	-	-
4-1 000 Hz	-	2	-	-	-	-
1 000 Hz-100 kHz	-	f/1500	-	-	-	-
100 kHz-10 MHz	-	f/500	0,08	2	4	-
10 MHz-10 GHz	-	-	0,08	2	4	-
10-300 GHz	-	-	-	-	-	10

Figure 36 : Niveaux limites d'exposition du public (décret n°2002-775).

GAMME de fréquences	E(V/m)	H(A/m)	B(μT)	DENSITÉ de puissance équivalente en onde plane Seq (W/m ²)
0-1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1-8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8-25 Hz	10 000	$4 000/f$	$5 000/f$	-
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	-
3-150 kHz	87	5	6,25	-
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2 000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	f/200
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Figure 37 : Niveaux de référence pour les champs. Le respect des niveaux de référence garantit le respect des restrictions de base (décret n°2002-775).

6.3.2 Code du travail

Le Code du travail fixe le cadre réglementaire applicable à la prévention des risques d'exposition aux champs électromagnétiques aux articles R. 4453-1 à R. 4453-34 qui font suite à la directive européenne 2013/35/UE. Ces valeurs, également issue des recommandations de l'ICNIRP, sont décrites au sein du décret n°2016-1074 (Figure 38, Figure 39, Figure 40).

Le Code du travail distingue :

- les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLE) à ne pas dépasser (art. R. 4453-3) et concernent les effets sur la santé ou les effets sensoriels ;
- les valeurs déclenchant les actions (VA) à mettre en œuvre comme mesures et moyens de prévention (art. R 4453-4). Leur respect garanti celui des VLE

FREQUENCE (f) (1)	VALEURS DECLENCANT L'ACTION						
	Effets biophysiques directs		Pour l'exposition aux champs électriques	Pour l'exposition aux champs magnétiques		Pour les courants induits	
			VA (E _{eff}) (2) (3)	VA (B _{eff}) (4)		VA (I _{eff}) (5)	
				VA basse (6)	VA haute (6)	Exposition des membres à un champ magnétique localisé	Dans une extrémité quelconque
1 Hz ≤ f < 8 Hz	Effets non thermiques	2x10 ⁴ V.m ⁻¹	2x10 ⁵ /f ² μT	3x10 ⁵ /f μT	9x10 ⁵ /f μT	-	
8 Hz ≤ f < 25 Hz			2,5x10 ⁴ /f μT			-	
25 Hz ≤ f < 50 Hz			1x10 ³ μT			-	
50 Hz ≤ f < 300 Hz				-			
300 Hz ≤ f < 1,64 kHz			6,1x10 ² V.m ⁻¹	3x10 ⁵ /f μT		-	
1,64 kHz ≤ f < 2,5 kHz						-	
2,5 kHz ≤ f < 3 kHz						-	
3 kHz ≤ f < 100 kHz			Effets thermiques	6,1x10 ² V.m ⁻¹ (non thermique et thermique)		1x10 ² μT	3x10 ² μT
100 kHz ≤ f < 1 MHz (7)	1x10 ² μT (non thermique) 2x10 ⁶ /f μT (thermique)	-					
1 MHz ≤ f < 10 MHz (7)	Effets thermiques	61 V.m ⁻¹	0,2 μT	-	100 mA		
10 MHz ≤ f < 110 MHz				-	-		
110 MHz ≤ f < 400 MHz				3x10 ⁻³ f ^{1/2} V.m ⁻¹	1x10 ⁻³ f ^{1/2} μT	-	-
400 MHz ≤ f < 2 GHz				1,4x10 ³ V.m ⁻¹	4,5x10 ⁻¹ μT	-	-
2 GHz ≤ f < 300 GHz							

(1) La fréquence f est exprimée en hertz (Hz)
(2) Les valeurs déclenchant l'action pour une exposition aux champs électriques sont des valeurs d'intensité de champ électrique exprimées en volt par mètre.
(3) Sur la gamme de fréquences comprises entre 1 et 400 hertz, pour une exposition à des champs électriques, la valeur déclenchant l'action permet de respecter les valeurs limites d'exposition relatives aux effets sensoriels et aux effets sur la santé mentionnées à l'article R. 4453-2
(4) Les valeurs déclenchant l'action pour une exposition à des champs magnétiques sont des valeurs d'induction magnétique exprimées en microtesla
(5) La valeur déclenchant l'action pour les courants induits est exprimée en milliampère
(6) Sur la gamme de fréquences comprises entre 1 et 400 hertz, pour une exposition aux champs magnétiques, la valeur déclenchant l'action basse permet de respecter les valeurs limites d'exposition relatives aux effets sensoriels pour une exposition localisée de la tête tandis que la valeur déclenchant l'action haute permet de respecter les valeurs limites d'exposition relatives aux effets sur la santé mentionnées à l'article R. 4453-2
(7) Dans la gamme de fréquences comprises entre 100 kilohertz et 10 mégahertz, les effets thermiques et non thermiques agissant concomitamment pour les expositions à des champs électriques et à des champs magnétiques, les valeurs déclenchant l'action pour les deux types d'effets et les deux types de champs doivent être considérées

Figure 38 : Valeurs déclenchant l'action liées aux effets biophysiques directs des champs électromagnétiques d'après le décret n°2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques.

FREQUENCE (f) (1)	VALEURS DECLENCHANT L'ACTION			
	pour le risque d'interférence avec des dispositifs actifs implantés	pour le risque d'attraction et de projection dans le champ périphérique de source de champs intenses (> 100 mT)	pour la limitation du risque de décharges d'étincelles	pour un courant de contact d'état stable
	AL(B ₀) (2)	AL(B ₀) (2)	VA (E _{eff}) (3)	VA (I _c) (4)
0 Hz ≤ f < 1 Hz	0,5 mT	3 mT	-	1 mA
1 Hz ≤ f < 25 Hz	-	-	2x10 ⁴ V.m ⁻¹	
25 Hz ≤ f < 2,5 kHz	-	-	5x10 ⁵ /f V.m ⁻¹	0,4 f mA
2,5 kHz ≤ f < 3 kHz	-	-		
3 kHz ≤ f < 100 kHz	-	-	1,7x10 ² V.m ⁻¹	40 mA
100 kHz ≤ f < 10 MHz	-	-		
10 MHz ≤ f ≤ 110 MHz	-	-	-	

(1) La fréquence f est exprimée en hertz (Hz) à l'exception de la valeur déclenchant l'action pour les courants de contact dans la gamme de fréquences comprises entre 2,5 et 100 kilohertz où elle est exprimée en kilohertz
(2) Les valeurs déclenchant l'action pour une exposition à des champs magnétiques statiques sont des valeurs d'induction magnétique exprimées en millitesla
(3) Les valeurs déclenchant l'action pour la limitation du risque de décharges d'étincelles sont des valeurs d'intensité de champ électrique exprimées en volt par mètre
(4) Les valeurs déclenchant l'action pour les courants de contact sont exprimées en milliampère

Figure 39 : Valeurs déclenchant l'action liées à certains effets indirects des champs électromagnétiques d'après le décret n°2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques.

FREQUENCES (f) (1)	VALEURS LIMITES D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE					
	Effets biophysiques directs	« Effets sensoriels »		« Effets sur la santé »		
		Exposition localisée de la tête	Exposition localisée des membres	Exposition ensemble du corps	Exposition localisée de la tête et du tronc	Exposition localisée des membres
0 Hz ≤ f < 1 Hz (2)	Effets non thermiques	2 T	8 T	8 T	-	-
1 Hz ≤ f < 10 Hz (3)		0,7 f V.m ⁻¹	-	1,1 V.m ⁻¹	-	-
10 Hz ≤ f < 25 Hz (3)		0,07 V.m ⁻¹	-		-	-
25 Hz ≤ f ≤ 400 Hz (3)		0,0028 f V.m ⁻¹	-		-	-
400 Hz < f < 3 kHz (3)		-	-		-	-
3 kHz ≤ f < 100 kHz (3)		-	-	3,8x10 ⁻⁴ f V.m ⁻¹	-	-
100 kHz ≤ f < 10 MHz (3) (4) (5)	Effets thermiques	-	-	3,8x10 ⁻⁴ f V.m ⁻¹ (non thermique) 0,4 W.kg ⁻¹ (thermique)	10 W.kg ⁻¹	20 W.kg ⁻¹
10 MHz ≤ f < 0,3 GHz (4)		-	-	0,4 W.kg ⁻¹		
0,3 GHz ≤ f < 6 GHz (4) (6)		10 mJ.kg ⁻¹	-	-	-	-
6 GHz ≤ f ≤ 300 GHz (7)		-	-	50 W.m ⁻²	-	-

(1) La fréquence f est exprimée en hertz (Hz)
(2) Dans la gamme de fréquences comprises entre 0 et 1 hertz, les valeurs limites d'exposition sont des valeurs d'induction magnétique externe exprimées en tesla
(3) Dans la gamme de fréquences comprises entre 1 hertz et 10 mégahertz, les valeurs limites d'exposition sont des valeurs crête spatiale du champ électrique interne exprimées en volt par mètre
(4) Dans la gamme de fréquences comprises entre 100 kilohertz et 6 gigahertz, les valeurs limites d'exposition relatives aux effets sur la santé représentent l'énergie moyenne sur l'ensemble ou une partie du corps (tête, tronc, membres) exprimée en termes de débit d'absorption spécifique en watt par kilogramme
(5) Dans la gamme de fréquences comprises entre 100 kilohertz et 10 mégahertz, les effets thermiques et non thermiques agissant concomitamment, les valeurs limites d'exposition pour les deux types d'effets doivent être considérées
(6) Dans la gamme de fréquences comprises entre 0,3 et 6 gigahertz, la valeur limite d'exposition relative aux effets sensoriels représente l'énergie absorbée par unité de masse de tissus biologiques exprimée en termes d'absorption spécifique en joules par kilogramme
(7) Dans la gamme de fréquences comprises entre 6 et 300 gigahertz, la valeur limite d'exposition relative aux effets sur la santé représente une densité de puissance exprimée en watt par mètre carré

Figure 40 : Limites pour l'exposition d'un travailleur à des champs électromagnétiques d'après le décret n°2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques.

6.4 Indices de l'environnement électromagnétique

6.4.1 Indices ICNIRP

L'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) propose un indice permettant de prendre en compte une exposition multifréquence (ICNIRP 2010 ; INRS 2001). La méthode la plus simple consiste à sommer les rapports entre les intensités des champs magnétiques et des niveaux de références pour chaque fréquence, selon l'expression suivante :

$$I_{ICNIRP} = \sum_{j=1Hz}^{10 MHz} \frac{B_j}{B_{L,j}} \quad (43)$$

Où :

- B_j est la densité de flux magnétique à la fréquence j ;

- $B_{L,j}$ est le niveau de référence à la fréquence j (ICNIRP2010).

Le même type d'indice peut être utilisé pour le champ électrique, la densité de courant induite ou le DAS (cf. partie 6.2). Cette somme doit être inférieure à 1 pour que l'exposition soit jugée conforme. Les effets thermiques et électriques sont généralement étudiés séparément.

Cependant, cette somme surestime l'exposition car elle suppose que les composantes du signal sont en phase. Afin d'éviter ceci, un autre indice est également proposé :

$$I'_{ICNIR\ t} = \left| \sum_j (WF)_j B_j \cos(2\pi f_j t + \theta_j + \varphi_j) \right| \quad (44)$$

Où :

- B_j est l'amplitude crête de la composante spectrale de fréquence j de l'induction magnétique ;
- θ_j est la phase de cette composante j ;
- $(WF)_j$ est la fonction de pondération dont la magnitude correspond à l'inverse de la valeur crête du niveau de référence de l'induction magnétique à la fréquence j . La magnitude de la fonction de pondération $(WF)_j$ est directement proportionnelle à f^2 , f et f^0 , et la phase de la fonction de pondération φ_j est respectivement de 180° , 90° et 0° ;
- φ_j est la phase de la fonction de pondération aux fréquences des harmoniques.

6.4.2 Indice INRIA

L'INRIA (Institut national de recherche en informatique et en automatique) a développé un indice d'exposition aux ondes électromagnétiques avec son application Electrosmart.

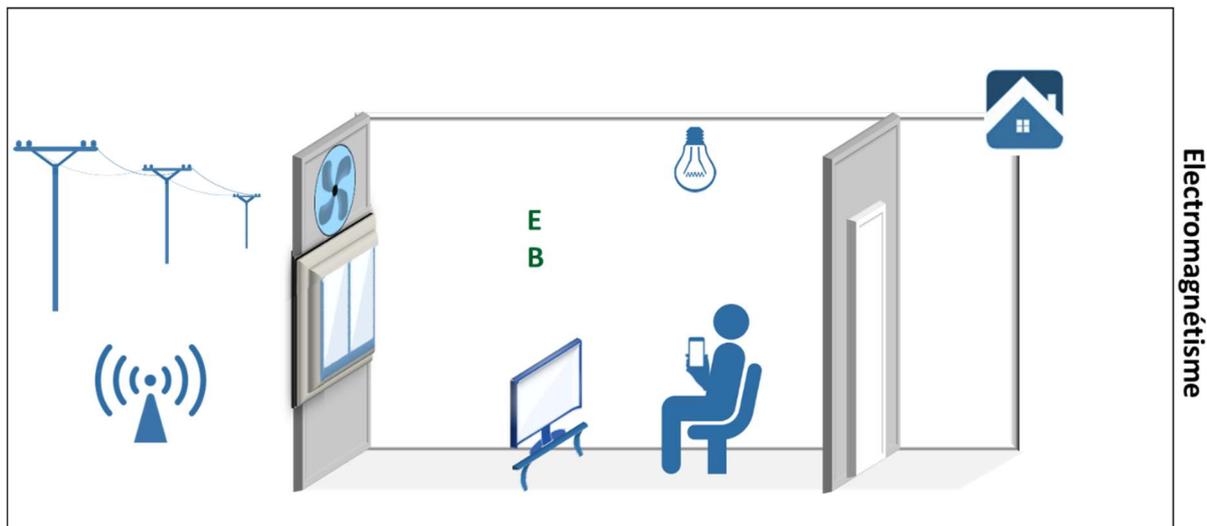
Celui-ci se base sur l'exposition aux réseaux téléphoniques (GSM-3G, LTE, etc.), aux réseaux Wi-Fi et aux terminaux connectés (bluetooth, etc.). Il fournit une note sur 100 permettant de se situer sur 3 échelons. La méthode de calcul utilise les données du smartphone mais n'est pas communiquée explicitement.

6.5 Synthèse

La Figure 41 illustre schématiquement les variables utiles à la définition des indices d'environnement électromagnétique.

Les sources intérieures, liées à l'utilisation et à la proximité avec des appareils électriques ou des téléphones, ne sont pas influencées par les actes de rénovation. De même l'influence des sources extérieures ne sera que très peu impactée par les travaux d'isolation.

Dans le cadre du projet Smart-Réno Il ne semble pas pertinent de prendre en compte cet aspect.



B : champs magnétique (T), E champs électrique ($V.m^{-1}$).

Figure 41 : Vue schématique des variables utiles à la définition des indices d'électromagnétisme.

7 Indices multicritères

Quelques études se sont attachées à identifier les facteurs clés influant sur la qualité globale des environnements intérieurs. Frontczak et al [Frontczak et al, 2011] montrent ainsi que la plupart des études, menées sur différents types de bâtiments (bureaux, bâtiments résidentiels, chambres climatiques, écoles), proposent un indice de confort global pour l'environnement intérieur avec des pondérations pour chaque critère du confort. Les résultats montrent que le confort thermique a une plus grande importance que le confort acoustique et la qualité de l'air intérieure, et une importance considérablement plus élevée par rapport au confort visuel. Ce document a également relevé que d'autres déterminants non liés à l'environnement intérieur, comme les caractéristiques individuelles des occupants du bâtiment, de construction et les facteurs liés au climat extérieur, pouvaient avoir une influence non négligeable sur les paramètres de la QEI.

7.1 Indice de la norme NF EN 15251

NF EN 15251 (2007) - 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

Selon la NF EN 15251 (2007) l'ambiance intérieure peut être évaluée de façon **détaillée** ou **globale**. Dans un cas où l'autre, l'évaluation dépendra du niveau de qualité intérieure pour lequel le bâtiment et ses systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation ont été conçus (Tableau 17).

Tableau 17 : Catégories de qualité de l'ambiance intérieure

Niveau	Description
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.
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

7.1.1 Evaluation détaillé

L'évaluation détaillée de l'ambiance intérieure comprend 6 critères, à savoir :

1. de conditions thermiques d'hiver
2. de conditions thermiques d'été
3. de qualité de l'air
4. de ventilation
5. d'éclairage
6. acoustiques

En plus de varier avec les catégories de qualité de l'ambiance intérieure, les exigences pour chacun de ces critères sont fonction du type d'analyse réalisée :

- a. des critères utilisés pour les calculs énergétiques (bâtiments neufs) ;
- b. des simulations sur une année complète de l'ambiance intérieure et des performances énergétiques (bâtiments neufs et existants) ;

- c. mesurage sur le long terme des paramètres sélectionnés pour l'ambiance intérieure (bâtiments existants) ;
- d. réponses subjectives des occupants (bâtiments existants).

Ainsi, en utilisant des critères pour les calculs énergétiques, la qualité d'une ambiance peut être évaluée telle que l'indique le Tableau 18.

Tableau 18 : Classification basée sur des critères pour les calculs énergétiques

Critères d'ambiance intérieure	Catégorie du bâtiment	Critères de conception
1 Conditions thermique d'hiver	II	20 – 24 °C ^a
2 Conditions thermiques d'été	III	22 – 27 °C ^a
3 Indicateur de qualité de l'air, CO ₂	II	500 ppm au-dessus de l'air extérieur ^b
4 Débit de ventilation	II	1 (l/s)/m ² ^c
5 Eclairage		E _m > 500 lx ; UGR < 19 ; 80 < R _a ^d
6 Ambiance acoustique		Bruit intérieur < 35 dB(A) ; Bruit extérieur < 55 dB(A) ^e

^a Annexe A – tableau A.3 ; ^b Annexe B – tableau B.4 ; ^c Annexe B ; ^d Annexe D ; ^e Annexe E

7.1.2 Evaluation globale

En ce qui concerne l'évaluation globale, la norme NF EN 15251 (2007) recommande qu'une « empreinte » résumant le confort soit donnée séparément pour des conditions thermiques et pour des conditions de qualité d'air intérieur. Ceci peut être présenté sous la forme de pourcentage de temps (températures, débits de ventilation ou concentrations de CO₂) pendant lequel l'ambiance intérieure se situe dans les différentes catégories (I, II, III et IV), comme exemplifié dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Exemple de classification par « empreinte » de l'ambiance intérieure et de la qualité/ventilation de l'air intérieur

Qualité de l'ambiance intérieure en % du temps répartie en 4 catégories

Pourcentage	5	7	68	20
Ambiance thermique	IV	III	II	I
Pourcentage	7	7	76	10
QAI	IV	III	II	I

7.2 Indice « Aéroport de Paris »

Cet indice a été élaboré par Aéroport de Paris et est adapté aux bureaux (OQAI, 2006).

Il s'agit d'une combinaison d'un indice de confort I_c et d'un indice de pollution I_p qui varient entre 1 (très bonne qualité de l'air) et 10 (mauvaise qualité de l'air).

$$I_c = \frac{2 I_{TH} + 3 I_{CO_2}}{5}$$

$$I_p = \begin{cases} \frac{3 I_{CO} + 3 I_{NO_2} + 6 I_{PM10}}{12} & \text{si } I_{NO_2} \text{ est connu} \\ \frac{3 I_{CO} + 6 I_{PM10}}{9} & \text{si } I_{NO_2} \text{ est inconnu} \end{cases} \quad (45)$$

Où : I_{TH} est un indice établi à partir d'un diagramme de confort hygrothermique (Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France « Allergie respiratoire, asthme, environnement » 1993)

$I_{CO_2} = 1$, si $C_{CO_2} < 400ppm$; $I_{CO_2} = 6$ si $1000 < C_{CO_2} < 1300$ et 8 sinon ;
 $I_{NO_2} = 8$, si $200 \mu g.m^{-3} < C_{NO_2} < 400 \mu g.m^{-3}$; $I_{NO_2} = 10$ si $400 \mu g.m^{-3} < C_{NO_2} (1h)$
 $I_{CO} = 6$ à $10ppm$, 8 à $25ppm$ et 10 à $50ppm$;
 $I_{PM_{10}}$ calcul semblable à l'indice ATMO en utilisant des limites doubles.

L'indice global I_g est obtenu ainsi :

$$I_g = \frac{2 I_p + I_{TH}}{3} \quad (46)$$

7.3 Indice IEI – Chiang et Lai (2002)

Chiang et Lai (2002) proposent un indice agrégeant cinq catégories de l'environnement intérieur : le confort acoustique, hygrothermique, visuel, la QAI et l'environnement électromagnétique. Chacune de ses catégories est basé sur un ou plusieurs indicateurs et un score sur 100, par tranche de 20, est associé à chacun d'entre eux. Une valeur élevée correspond à une bonne qualité de l'ambiance.

Dans le cas ou une catégorie est évaluée par plusieurs indicateurs, si l'un d'entre eux est inférieur à 60 alors la valeur la plus faible est retenue pour toute la catégorie. Si tous les indicateurs d'une catégorie sont supérieurs à 60, alors la moyenne des indicateurs est utilisé.

Le Tableau 20 recapitule les indices considérés et les scores associés à leurs valeurs.

Tableau 20 : tableau récapitulatif des indices considérés et les scores associés à leurs valeurs, d'après (Chiang et Lai, 2002).

Catégories	Indicateurs	Score				
		20	40	60	80	100
Confort acoustique	L_{eq} 24h (dB(A))	>55	50-55	45-50	40-45	<35
Confort visuel	Eclairage moyen de l'ambiance (lx)	<70	70-150	150-300	300-500	>500
	Uniformité de l'éclairage (%)	<0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	>0,8
	Facteur lumière du jour (%)	<0,5	0,5-0,7	0,7-1	1,0-2,0	>2,0
Confort hygrothermique	Température intérieure – été (°C) max/min	>29 <21	28-29 21-22	27-28 22-23	26-27 23-24	<26 >25
	Température intérieur – printemps (°C) max/min	>28 <20	27-28 20-21	26-27 21-22	25-26 22-23	<25 >23
	Température intérieure – hiver (°C) max/min	>27 <19	26-27 19-20	25-26 20-21	24-25 22-21	<24 >22
	Humidité relative intérieure (%) max/min	>90 <30	80-90 30-35	70-80 35-40	60-70 40-45	<60 >45
	Vitesse de l'air intérieur (m.s ⁻¹)	>0,45	0,35-0,45	0,25-0,35	0,15-0,25	<0,15
	PMV	>2,0	1,5-2	1-1,5	0,5-1	<0,5
QAI	PM ₁₀ (24h) (mg.m ⁻³)	>350	150-350	50-150	25-50	<25
	CO (8h) (ppm)	>15	9-15	4,5-9	2-4,5	<2
	CO ₂ (8h) (ppm)	>2500	1000-2500	800-1000	600-800	<600

	Formaldéhyde (8h) (ppb)	>1000	100-1000	16-100	8-16	<8
	COV totaux (mg.m ⁻³)	>3	0,3-3	0,1-0,3	0,05-0,1	<0,05
Environnement Electromagnétique	Champ électrique basse fréquence (kV/m)	>25	19-25	12-19	5-12	<5
	Champ magnétique basse fréquence (μT)	>1600	1100-1600	600-1100	100-600	<100

Chiang et Lai (2002) proposent également un indice agrégé selon l'expression suivante :

$$I_{IEI-CL} = 0,203 S_{acoustique} + 1,164 S_{visuel} + 0,208 S_{hygrothermique} + 0,29 S_{QAI} + 0,135 S_{EM} \quad (47)$$

Où : $S_{acoustique}$ est le score de la catégorie confort acoustique ;
 S_{visuel} est le score de la catégorie confort visuel ;
 $S_{hygrothermique}$ est le score de la catégorie confort hygrothermique ;
 S_{QAI} est le score de la catégorie QAI ;
 S_{EM} est le score de la catégorie environnement électromagnétique.

7.4 Indice IEI – Moschandreas et Sofuoglu (2004)

Cet indice de QEI combine l'indice de QAI IAPI (cf. partie 5.3) et l'indice de confort hygrothermique IADI (cf. partie 2.3). La Figure 42 rappelle le principe d'agrégation de ces indices.

Moschandreas et Sofuoglu (2004) le définit simplement comme la moyenne de l'IAPI et de l'IADI.

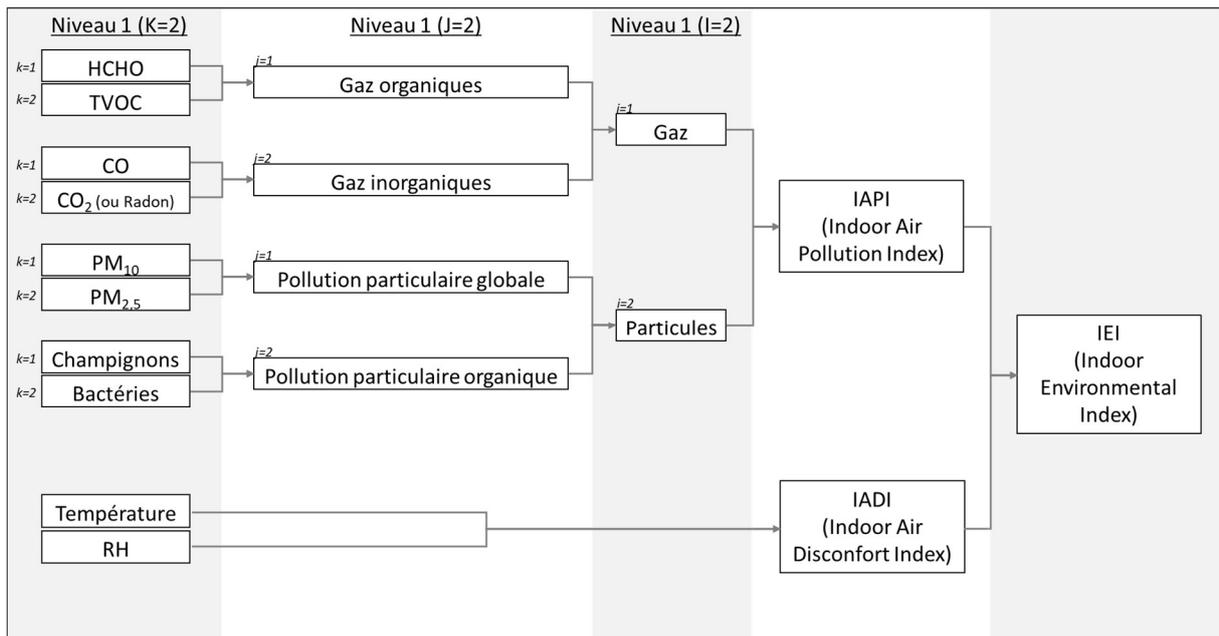


Figure 42 : Vue schématique du calcul de l'indice IEI, d'après Moschandreas et Sofuoglu (2004).

7.5 Indice TAIL – Wargocki et al. (2019)

Cet indice est développé dans le cadre du projet ALDREN (Alliance for Deep RENovation in buildings) dont une des principales tâches est de déterminer si les rénovations énergétiques affectent le confort et la santé des occupants. L'objectif de ce projet est de développer une méthode d'évaluation prenant en compte les bénéfices QEI non liés uniquement aux gains énergétiques.

Avec pour objectifs de notamment promouvoir les opérations de rénovations et la qualité de celles-ci, cet indice a pour vocation d'être utilisé avant et après les actes de rénovations. Il propose de noter quatre catégories de confort avec un code couleur allant du vert (bonne qualité) au rouge (mauvaise qualité), référencées par les quatre lettres de l'acronyme (Figure 43) :

- T pour « Thermal confort » ou confort thermique ;
- A pour « Acoustic confort » ou confort acoustique ;
- I pour « Indoor air quality » ou qualité d'air intérieur ;
- L pour « Luminous confort » ou confort visuel.

Une note globale sur 4 est également indiquée en signe romain et agrège les quatre catégories. Plus ce chiffre est faible, meilleur est la QEI. Ce système est en accord avec la norme NF EN 16798-1 (2019) qui traite des paramètres d'ambiance intérieure pour l'ambiance thermique, la qualité de l'air intérieur, l'éclairage et l'acoustique. Il est à noter que ce projet se concentre sur le secteur tertiaire.

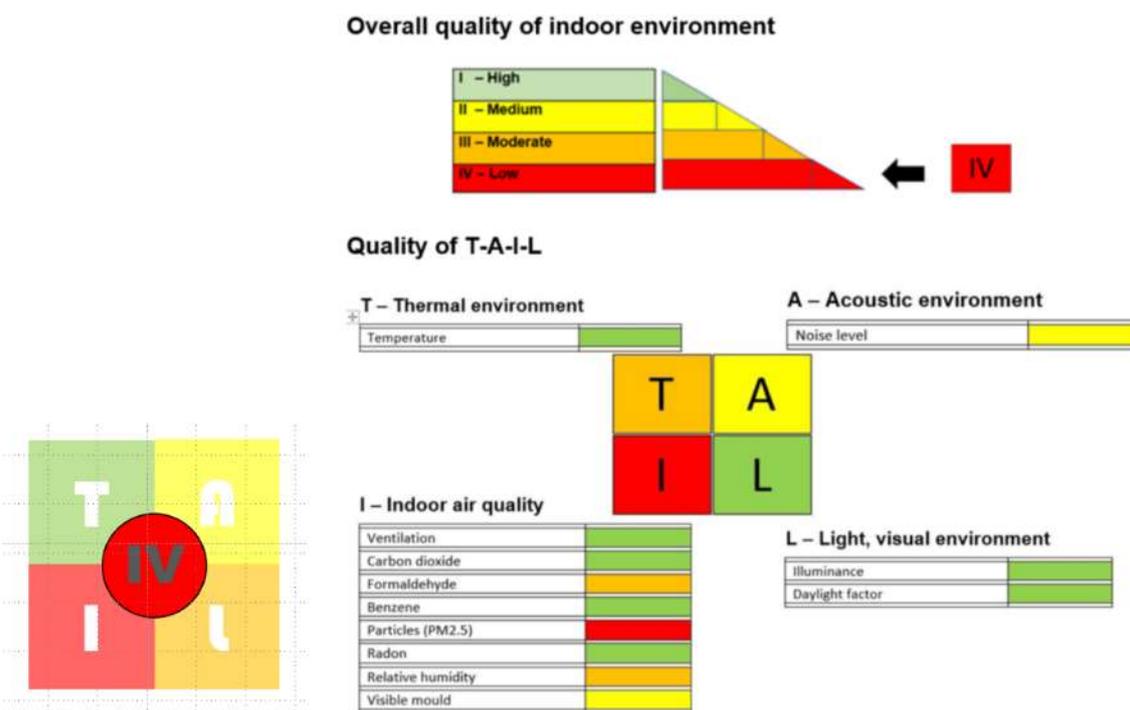


Figure 43 : Exemples de représentations graphiques de l'indice TAIL (Wargocki et al., 2019). La figure de droite consiste une proposition d'intégration aux EVCS (European Voluntary Certification Scheme) pour la certification des bâtiments vis-à-vis de la QEI.

Les tableaux Tableau 21 à Tableau 24 récapitulent les différents critères utilisés pour catégoriser les bureaux au niveau des environnements thermique, acoustique, QAI et visuel.

Tableau 21: synthèse des critères de classement pour l'environnement thermique pour l'indicateur TAIL.

Paramètres	Saison	Climatisation mécanique				Pas de climatisation mécanique			
		Cat I	Cat II	Cat III	Cat IV	Cat I	Cat II	Cat III	Cat IV
Température de l'air (°C)	Chauffe	21-23	20-24	19-25	Autre	21-23	20-24	19-25	Autre
	Hors chauffe	23,5-25,5	23-26	22-27	Autre	$<0,33T_m+20,8$ $>0,33T_m+15,8$	$<0,33T_m+21,8$ $>0,33T_m+14,8$	$<0,33T_m+22,8$ $>0,33T_m+13,8$	Autre

T_m : température moyenne glissante extérieure.

Tableau 22 : synthèse des critères de classement pour l'environnement acoustique pour l'indicateur TAIL.

Paramètres	Bureau - petit				Bureau ouvert			
	Cat I	Cat II	Cat III	Cat IV	Cat I	Cat II	Cat III	Cat IV
Niveau de bruit dû aux équipements (dBA)	<30	<35	<40	Autre	<35	<40	<45	Autre

Tableau 23 : synthèse des critères de classement pour la QAI pour l'indicateur TAIL.

Paramètres	Bureau			
	Cat I	Cat II	Cat III	Cat IV
Concentration CO ₂ (ppm)	<550	<880	<1350	Autre
Ventilation minimum	10 L.s ⁻¹ .p ⁻¹ ou 2 L.s ⁻¹ .m ⁻²	7 L.s ⁻¹ .p ⁻¹ ou 1,4 L.s ⁻¹ .m ⁻²	4 L.s ⁻¹ .p ⁻¹ ou 0,8 L.s ⁻¹ .m ⁻²	2,5 L.s ⁻¹ .p ⁻¹ ou 0,6 L.s ⁻¹ .m ⁻²
Humidité relative (%)	>40%	30-40%	10-30%	<10%
Moisissure (contrôle visuel)	Aucune	<400 cm ²	<2500 cm ²	>2500 cm ²
Benzène (µg.m ⁻³)	<2	2-5		>5
Formaldéhyde (µg.m ⁻³)	<30	30-100		>100
Particules – PM _{2.5} (µg.m ⁻³)	<10	10-25		>25
Si possible : moyenne glissante 8h PM _{2.5} (µg.m ⁻³)	Toujours <15 µg.m ⁻³	Dépasse 15 µg.m ⁻³ une fois / semaine		Dépasse 15 µg.m ⁻³ 2-3 fois / semaine
Radon (Bq.m ⁻³)	<100	100-300		>300

Tableau 24 : synthèse des critères de classement pour le confort visuel pour l'indicateur TAIL.

Paramètres	Bureau			
	Cat I	Cat II	Cat III	Cat IV
FLJ (%)	>7	4-7	2-4	<2
Eclairage (% du temps où les recommandations sont atteintes : 300-500 lux selon le type de bureau)	60-100	40-60	10-40	<10

7.6 Annexe 68

Afin de proposer un affichage informant à la fois sur la qualité de l'air et sur l'efficacité énergétique d'une ambiance, Cony Renaud Salis et al. (2017), proposent, dans le cadre de l'annexe 68 de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), d'utiliser trois indices de QAI complémentaires et un indice d'efficacité énergétique.

Les indices de QAI sont les suivant :

- IAQ-STEL (*Short-Term Exposure Limit*) : basé sur les limites d'exposition à court terme (1h, 8h, etc., selon les données disponibles), il informe sur la fréquence à laquelle la concentration intérieure dépasse cette limite, pour chaque polluant considéré. Par exemple, une valeur de 30% pour un polluant signifie que sa concentration dépasse la limite d'exposition à court terme 30% du temps.
- IAQ-LTEL (*Long-Term Exposure Limit*) : basé sur les limites d'exposition à long terme. Par exemple, une valeur de 2 pour un polluant signifie que la concentration moyenne en ce polluant est deux fois supérieure à la limite d'exposition à long terme.

- IAQ-DALY : basé sur le calcul du DALY (cf. partie 5.3).

L'agrégation de ces deux premiers indices se fait en prenant en compte le polluant ayant l'indice maximal pour chacun des indicateurs. L'agrégation du DALY se fait en sommant les années équivalentes de vies perdues, pour une population donnée, du fait de l'ensemble des polluants pris en compte.

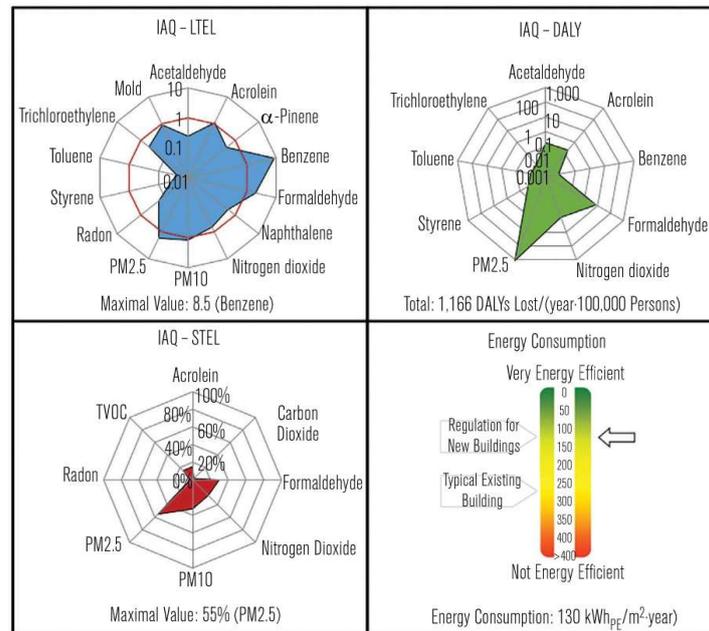


Figure 44 : Exemple de représentation graphique proposée dans le cadre de l'annexe 68 (Cony Renaud Salis et al., 2017).

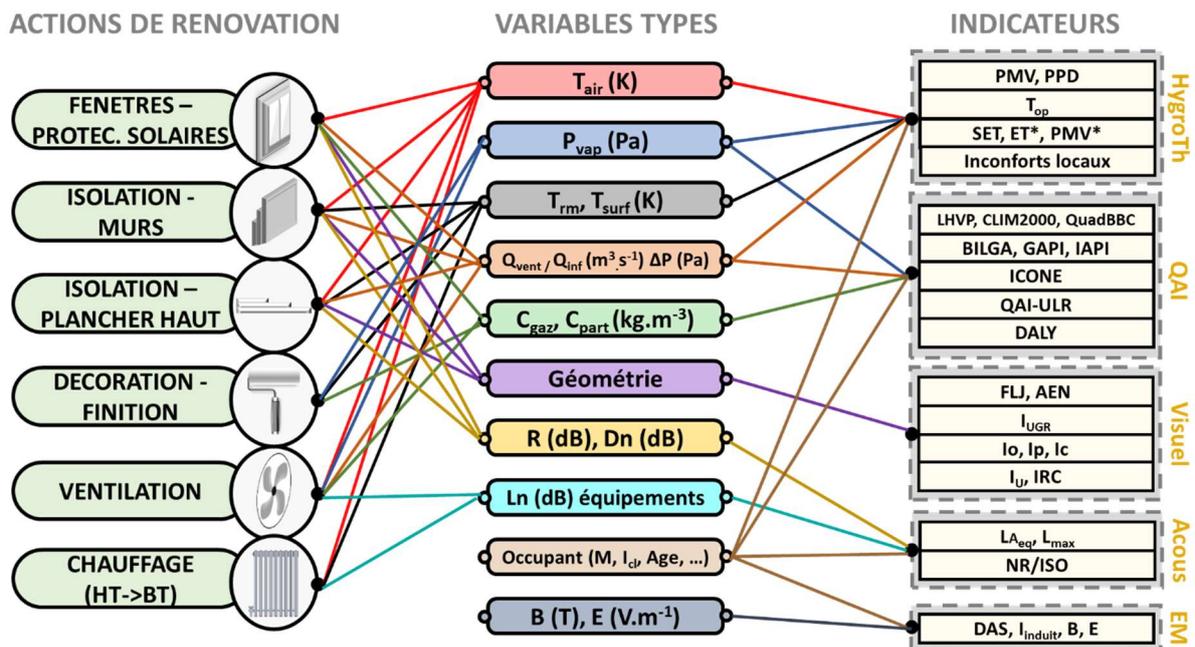
8 Conclusion

Ce rapport présente une étude bibliographique définissant les différentes catégories influençant le bien-être des occupants : le confort hygrothermique, le confort visuel, le confort acoustique, la QAI et l'environnement électromagnétique. L'étude de l'impact des principaux actes de rénovation, non seulement concernant les performances énergétiques, mais aussi le bien-être des occupants, est un prérequis à la création d'offres de rénovations visibles, fiables et argumentées.

Dans ce cadre, ce rapport propose une liste d'indicateurs discutée afin de mettre en avant des critères objectifs d'évaluation de travaux de rénovation qui dépassent la simple prise en compte des performances énergétiques. Pour chaque catégorie de confort les paramètres et variables nécessaires à la modélisation ou à la mesure de ces indicateurs sont répertoriés. Plusieurs approches multicritères proposées dans la littérature sont également présentées.

La Figure 45 présente une synthèse des impacts attendus des principaux actes de rénovations, identifiés au livrable 3.2, sur les indicateurs associés aux différentes catégories de confort.

La Figure 46 illustre la lecture de cette synthèse sur l'exemple d'un acte de rénovation : le changement des fenêtres. Ce changement influence en effet l'isolation thermique de l'enveloppe, la perméabilité au niveau de la jonction avec la paroi, la géométrie et ainsi l'influence de la lumière du jour, la transmission des bruits extérieurs, etc. Un impact est donc attendu sur les indicateurs de confort hygrothermique, visuel et acoustique ainsi que sur la QAI.



HT/BT : Haute/Basse température, T_{air} : température de l'air (K), P_{vap} : pression de vapeur (Pa), T_{rm} : température radiante moyenne (K), T_{surf} : température de surface des parois (K), Q_{vent} : débit d'air de ventilation ($m^3.s^{-1}$), Q_{inf} : débit d'air d'infiltration ($m^3.s^{-1}$), ΔP : différence de pression (Pa), C_{gaz} : concentrations des polluants gazeux ($kg.m^{-3}$), C_{part} : concentrations des polluants particulaires ($kg.m^{-3}$), R : affaiblissement acoustique (dB), D_n : isolement acoustique (dB), L_n : niveau de pression acoustique normalisé (dB), M : production de chaleur métabolique ($W.m^{-2}$), I_{cl} : isolation thermique des vêtements ($m^2.K.W^{-1}$), B : champs magnétique (T), E : champs électrique ($V.m^{-1}$), PMV : Predicted Mean Vote (Fanger, 1970), PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied (Fanger, 1970), T_{op} : température opérative (K), SET : Standard Effective Temperature (K), LHVP : Indice du Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris (Castanet, 1998), Indice Clim2000 (Gadeau, 1996), Indice de QuadBBC (QUAD-BBC, 2012), indice BILGA (Cohas, 1996), indice IAPI (Sofuoglu et Moschandreas, 2003), indice GAPI (Cariou et Guillot, 2005), indice IAQ-ULR (Cony et al., 2017), indice DALY (Disability adjusted life Expectancy) (Logue et al., 2011), FLJ : facteur lumière du jour (%), AEN : autonomie d'éclairage naturel (%), UGR : Unified Glare Rating (sans unité), $I_o/I_p/I_c$ respectivement indices d'ouverture, de profondeur et corrigé (sans unité), I_U : indice d'uniformité de l'éclairement, IRC : indice de rendu des couleurs (sans unité), $L_{A_{eq}}$: niveau sonore

équivalent (dB), L_{max} : niveau acoustique maximum (dB), NR/ISO : courbes de « Noise Rating » ou ISO, DAS : débit d'absorption spécifique ($W.kg^{-1}$), I_{induit} : courant induit par les champs électromagnétique au niveau de la peau ($A.m^{-2}$).

Figure 45 : Illustration des impacts attendus des différents actes de rénovation sur les indicateurs relevés.

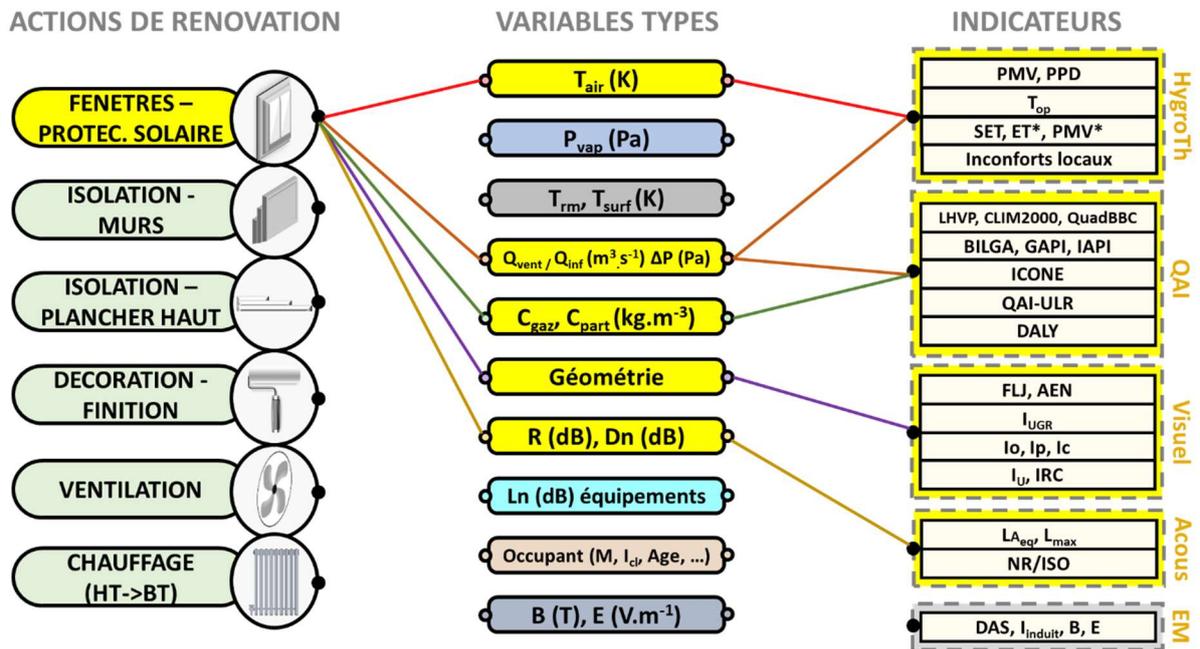


Figure 46 : Figure associée avec la Figure 45. Exemple d'un acte de rénovation : changement de fenêtres.

9 Références :

- Abadie M., Nicolle J., Blondeau P. 2013. Mémento « Santé Bâtiment », guide de recommandations à destination des acteurs de l'immobilier du Groupe Caisse des Dépôts, 91p.
- Abadie M., Wargocki P., Rode C., Zhang J. 2019. Proposed Metrics for IAQ in Low-Energy Residential Buildings. *ASHRAE Journal*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 61 (1).
- Abadie, M., Wargocki, P. et al., 2016. IEA EBC Annex 68 – Indoor Air Quality Design and Control in Low-energy Residential Buildings. Rapport : SUBTASK 1: Defining the metrics
- Allard F., 2002. Natural ventilation in buildings. A design handbook.
- Allen, J.G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J.D., 2016. Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. *Environmental Health Perspectives*, 124(6)
- ANSES 2018. Liste des Valeurs guides de qualité d'air intérieur de l'Anses (https://www.anses.fr/fr/system/files/Tableau_VGAI_Juillet%202018.pdf)
- ASE 1989. Eclairage interieur par la lumiere du jour. Zurich (CH): Association Suisse Des Electriciens;
- Berger X., 1995. Thermal comfort, study and code. PASCOOL report. Athènes: University of Athens, 69p.
- Bernstein D., Champetier JP., Hamayon L., Mudri L., Traisnel JP., 2007. Traité de construction durable., Vidal T. Editions.
- Billionnet, C., Sherrill, D., & Anneso-Maesano, I., 2012. Estimating the Health Effects of Exposure to Multi-Pollutant Mixture. *Annals of Epidemiology*, 22(2), 126-141.
- Blyussen P.M, de Oliveira Fernandes E., Fanger P.O, Clausen G., Roulet C.A, Bernhard C.A and Valbjörn O. , 1995. European audit project to optimise indoor air quality and energy consumption in office buildings, Final report. Contract J0U2-CT92-002, March, Delft, The Netherlands.
- Cadiegues, R., 2012. L'éclairage artificiel, guide RefCad nR27 (<https://media.xpair.com/auxidev/nR27a.pdf>)
- Cariou S., Guillot J.M. 2005. A global indicator as a tool to follow airborne molecular contamination in a controlled environment. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 381, pp. 850-853.
- Carluccia, S., Causone F., De Rosa F. Lorenzo Pagliano L., 2015. A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47, pp. 1016–1033.
- CEREMA 2018. Recommendations duroupe de travail du Club Ventilation: « Critères d'équivalence des systèmes modulant le renouvellement d'air » (<https://www.cerema.fr/fr/actualites/club-ventilation-groupe-travail-criteres-equivalence>)
- Chiang, C.M., Lai, C.M., 2002. A study on the comprehensive indicator of indoor environment assessment for occupants' health in Taiwan, *Build. Environ.* 37(4), 387–392.
- Cohas M. 1996. Ventilation et Qualité de l'Air dans l'Habitat. Numéro spécial de la revue Chaud Froid Plomberie.
- Cony Renaud Salis L., Abadie M., Wargocki P., Rode C. 2017. Towards the definition of indicators for assessment of indoor air quality and energy performance in low-energy residential buildings. *Energy and Buildings*, 152, 492 - 502.
- CSTC, 2011. Guide pratique et technique de l'éclairage résidentiel du Centre Scientifique et Technique de la Construction, Belgique.
- De Dear R.J., Brager G.S. , 1998. Developing an adaptive model to thermal comfort and preference. *ASHARE transactions*, 1998, vol. 104, Part 1A, pp. 145-167.
- Deng, Q., Deng, L., Miao, Y., Guo, X., & Li, Y., 2019. Particle deposition in the human lung: Health implications of particulate matter from different sources. *Environmental Research*, 169, pp. 237-245.
- Depecker P et al., 1989. Qualité thermique des ambiances. Cahiers pédagogiques Thermique et Architecture, AFME 66 p.
- Dhalluin A., 2012. Etude de strategies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire, 302p
- European Committee for Standardization, « EN 15251: 2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics », août 2007.
- Fauconnier, R., 1992. L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaries. *Revue Chauffage Ventilation Conditionnement* 10/1992 (<http://www.energieplus-lesite.be>)
- Fanger, P. O., 1970. Thermal comfort. Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press 244 p.

- Gadeau A.L. 1996. Assessment of ventilation strategies using an air quality index introduced in CLIM 2000 software. Proceedings of Healthy Buildings 2000, Espoo, Finland, 4, pp. 23-24.
- Gagge A.P, Stolwijk J.A, Nishi Y., 1971. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. ASHRAE Transactions, 77, pp. 247-257
- Gagge A.P, 1973. Rational indices of man's thermal environment and their use with a 2-node model of his temperature regulation. Fed. Proc., 32, 1572-1982
- Gagge A.P., 1986. A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHARE transactions, vol. 92, Part 2B, pp. 709-731
- GE08, 2019. Préparation de la RE2020 – Groupe d'expertise 08: confort d'été : Rapport final. Accessible : http://www.batiment-energiecarbone.fr/IMG/pdf/ge8__confort_d_ete_rapport_final.pdf
- Hänninen O., Knol A. 2011. European Perspectives on Environmental Burden of Disease – Estimates for 9 Stressors in Six European Countries. Report, National Institute of Health and Welfare, Finland, ISBN 978-952-245-413-3.
- Hofmann, W., 2011. Modelling inhaled particle deposition in the human lung - A review. *Journal of Aerosol Science*, 42(10), pp. 693-724.
- ICEB et ARENE, 2014. L'Éclairage Naturel - Les Guides BIO-TECH.
- ICNIRP 1998. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (up to 300 ghz). Health Physics, 74(4) :494—522, Avril 1998. 2, 3, 6, 11,20, 22, 23, 70
- ICNIRP 2010. Guidelines for limiting exposure totime-varying electric and ma-gnetic fields (1 hz to 100 khz)..Health Physics, 99(6) :818–836, Décembre 2010. 11, 12,17, 20, 21
- IFOP 2014. Sondage de l'Institut français d'opinion publique.
- INRS 2001. Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques. Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail - N° 182, 1er trimestre 2001
- ISOVER. 2018. Guide ISOVER L'acoustique du bâtiment Les fondamentaux. Téléchargeable sur <https://www.isover.fr/sites/isover.fr/files/assets/documents/Guide-Acoustique-Batiment.pdf>
- Kirchner S., Jédor B., Mandin C. 2006. Elaboration d'indices de la qualité de l'air intérieur : phase 1 – Inventaire des indices disponibles. Rapport DDD-SB/2006-065, 49p.
- Knudsen V.O, Harris C.M (1957). Le projet acoustique en architecture. Dunod, 376 p.
- Li D.H.W., Tsang E.K.W. 2008. An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong-Kong. Building and Environment, 43, pp. 1446–1458.
- Logue, JM, Price PN, Sherman MH, Singer BC. 2011. A Method to Estimate the Chronic Health Impact of Air Pollutants in U.S. Residences. Environmental Health Perspectives, 120 (2), 216–222.
- Lucattini, L., Poma, G., Covaci, A., de Boer, J., Lamoree, M.H., & Leonards, P.E.G., 2018. A review of semi-volatile organic compounds (SVOCs) in the indoor environment: occurrence in consumer products, indoor air and dust. *Chemosphere*, 201, pp. 466-482.
- Michael Maged. Virtualisation de la mesure d'exposition du public général au champ magnétique basse fréquence dans le domaine de l'automobile. Autre. Université Paris-Saclay, 2018.
- Moschandreas, D., Sofuoglu, S.C., 2004. The Indoor Environmental Index and Its Relationship with Symptoms of Office Building Occupants. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54, pp. 440–1451.
- Moujalled, 2007. Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilé. Thèse de doctorat, INSA, Lyon
- NF EN ISO 3382-2, 2010 : Acoustique - Mesurage des paramètres acoustiques des salles - Partie 2 : durée de réverbération des salles ordinaires
- OQAI 2006. Elaboration d'indices de la qualité de l'air intérieur : Phase 1 : Inventaire des indices disponibles. Rapport final.
- Parsons K., 2003. Human thermal environment. Edition. London: Taylor & Francis, 527 p.
- Peeters L., de Dear R., Hensen J., D'haeseleer W. 2009. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation, Applied Energy, 86(5), pp. 772-780.
- Quad-BBC. 2012. Choix de paramètres de suivi de la qualité de l'air intérieur. Livrable Tâche 1.2 du projet Quad-BBC « Qualité d'air intérieur et systèmes de ventilation dans les bâtiments à basse consommation d'énergie », janvier.
- Reingruber, H. & Pontel, L.B., 2018. Formaldehyde metabolism and its impact on human health. *Current Opinion in Toxicology*, 9, pp. 28-34.

- Reiter S., De Herde A. 2004. L'éclairage naturel des bâtiments, Presses universitaires de Louvain, http://www-energie.arch.ucl.ac.be/eclairage/guide_intro.htm.
- Ribéron et al., 2016. *Pollution atmosphérique* n°228 – janvier-mars 2016. Accessible à : http://odel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/docannexe/file/5466/1228_05_riberon.pdf
- Sofuoglu S.C., Moschandreas D.J. 2003. The link between symptoms of office building occupants and in-office air pollution: the Indoor Air Pollution Index. *Indoor Air*, 13, pp. 332-343.
- Tong, Y., Luo, K., Li, R., Pei, L., Li, A., Yang, M., & Xu, Q., 2018. Association between multi-pollutant mixtures pollution and daily cardiovascular mortality: An exploration of exposure-response relationship. *Atmospheric Environment*, 186, pp. 136-143.
- US-EPA. 2015. Air Quality Index (AQI) Basics. <http://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>
- WHO, 2002. « Establishing a dialogue on risks from electromagnetic fields ». World Health Organization.
- Wienold, J., Christoffersen J., 2005. Towards a new daylight glare rating, In: Proceedings of the 10th European Lighting Conference, Lux Europa 2005. Berlin (DE). pp. 157–161.
- Zhang, H., E. Arens, C. Huizenga et T. Han, 2010a. « Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts ». In: *Building and Environment* 45.2, p. 380–388.
- Zhang, H., E. Arens, C. Huizenga et T. Han, 2010b. « Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts ». In: *Building and Environment* 45.2, p. 389–398.
- Zhang, H., E. Arens, C. Huizenga et T. Han, 2010c. « Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort ». In: *Building and Environment* 45.2, p. 399–410.