

Confort d'été passif



SOMMAIRE

1 • ENJEUX ET CONTEXTE	4
2 • LE CONFORT THERMIQUE	7
2.1 • Les paramètres du confort thermique	7
2.2 • Les modèles du confort thermique	10
3 • LE CLIMAT	17
3.1 • Les données climatiques	17
3.2 • Les corrections aux données des stations météo	19
3.3 • Le climat dimensionnant	20
4 • LES SOLUTIONS ARCHITECTURALES ET TECHNIQUES	23
4.1 • L'architecture bioclimatique	23
4.2 • L'environnement extérieur : créer des îlots de fraîcheur	25
4.3 • Réduire les charges internes	28
4.4 • Les charges externes	35
4.5 • Les inerties	40
4.6 • La ventilation	42
4.7 • Les solutions techniques à faible consommation d'énergie	45
4.8 • Les spécificités de la réhabilitation	49
5 • LES MÉTHODES DE CALCULS	53
5.1 • Les simulations thermiques dynamiques	53
5.2 • Les méthodes simplifiées, sur le pouce	56
6 • EXEMPLES	63
7 • BIBLIOGRAPHIE	68
7.1 • Les fondamentaux	68
7.2 • L'architecture	68
7.3 • Les normes	68
7.4 • Pour en savoir plus sur le confort thermique d'été	68
7.5 • Approche psychosociologique du confort thermique d'été	68
7.6 • L'îlot de chaleur urbain	69
7.7 • Le vent	69
8 • LES DIX REFLEXES QUI PEUVENT ÉVITER LA CLIMATISATION	70
	71

Pilotage : L'ICEB, Alain Bornarel (TRIBU)

Rédaction : Ouvrage réalisé à la suite d'un groupe de travail de l'ICEB, coordonné par Alain Bornarel (TRIBU) avec les contributions de Alain Bornarel (TRIBU), Sophie Brindel Beth (SLH), Baptiste Brisedou (Albert & Cie), Eric Bussolino (AIA), Sonia Cortesse (ADSC), Jacques Fradin (IME), Yasmine Mansouri (Elan), François Xavier Monaco (Les ENR), Michel Raoust (Terao), Marc Serieis (Albert&Cie).

Coordination éditoriale : Pascale Gorges, Pascale Céron ARENE Île-de-France

Exécution graphique : Caroline Rampon - caroline.rampon.infographiste@gmail.com

Crédits photographiques : Alto Ingénierie, Tribu, Terao, Arval, Réhau, Helios Ventilateurs, S. Brindhel-Beth, Arval, Atelier Philippe Madec, ARENE Île-de-France, Tribu.

Illustrations à main levée : Yvan Fouquet (Atelier BAM)

Date d'impression : Avril 2014, imprimé sur du papier 100 % recyclé éco-label européen

Imprimeur : Prestaprint

ISBN EAN : 978-2-911-533-07-5



Cette édition de la série des guides « BIO-TECH », que vous proposent l'ARENE Île-de-France et l'ICEB développe le thème du confort d'été passif. Son ambition est d'accompagner et d'étayer la nécessaire mutation des pratiques professionnelles. En effet, issus d'une époque où l'énergie était abondante et bon marché, les normes et standards incitent, de fait, à la climatisation. Celle-ci est devenue la règle et contribue sur tous les continents, et aussi le nôtre, à aggraver le réchauffement climatique et à renforcer notre dépendance énergétique.

Ce guide vise à vulgariser les normes, standards, méthodes de calcul et solutions architecturales et techniques du confort d'été passif. La conception de nouveaux bâtiments à faibles besoins de chauffage, bien isolés et profitant des apports solaires, peut générer des inconforts en été si cette question n'est pas traitée en simultané. Elle oblige les concepteurs à s'emparer de cette problématique. Vivre bien en été, sans climatisation ni rafraîchissement, c'est possible.

Ce faisant, l'ICEB inscrit son action dans la continuité de celle de ses collègues des DOM TOM qui défendent ces solutions passives depuis longtemps. Outre-Atlantique, depuis 2009, au sein de l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers), les professionnels font également évoluer, dans ce sens, les règles et standards du confort d'été.

L'ARENE, quant à elle, accompagne les acteurs franciliens autour des questions de l'énergie et du climat, et plus particulièrement les démarches « plan climat énergie territorial » des collectivités. Elle aide à réfléchir, dans le contexte régional, autour des démarches les plus innovantes, telle celle du bâti vernaculaire qui contribue à l'amélioration de notre environnement et de notre habitat.

Loi du recours habituel aux systèmes énergivores, ce guide démontre que les solutions aux problèmes du confort d'été relèvent à la fois des comportements, du paysage, avec l'aménagement et la végétalisation des espaces extérieurs, et aussi de l'architecture, avec des bâtiments conçus avec une enveloppe rigoureusement fermée aux charges solaires d'été et largement ouverte à la ventilation naturelle.

Les explications, très pédagogiques, sur les fondamentaux du confort d'été, les outils de mesure et de calcul et la présentation de nombreuses solutions architecturales et techniques font de ce guide un véritable outil d'aide à la conception.

1. Enjeux et contexte



Siège IGN Météo France à Saint Mandé © Laura Carducci

A travers l'histoire, de nombreux philosophes ont décrit la recherche du bonheur comme la première et plus essentielle motivation d'un être humain. Le confort thermique est une composante de ce bonheur qui contribue au bien-être de l'individu en environnement construit.

Pendant des siècles, les hommes se sont efforcés de traiter le confort en été de façon passive, par l'architecture et la morphologie urbaine. Les années 70, avec le développement de la climatisation, représentent une révolution culturelle pour la notion de confort d'été.

Nous sommes à la veille d'une autre révolution culturelle du même type. En effet, la problématique du confort d'été va occuper une place principale dans les années à venir. Le changement climatique, dont le réchauffement, déjà

sensible sur les dix dernières années, va s'imposer et repousser, loin vers le nord, la limite au sud de laquelle les questions d'été deviennent prépondérantes sur les questions d'hiver¹. Les conditions sont réunies pour transférer vers l'été et vers les demandes de climatisation les problèmes de pointe de consommation que nous connaissons aujourd'hui en hiver. La raréfaction des énergies et leur coût croissant vont favoriser une approche passive de cette problématique.

C'est une opportunité tout à fait intéressante pour nous autres concepteurs, celle d'imaginer les solutions architecturales et techniques passives qui devront prendre le relai du tout climatisation des années d'énergie abondante et bon marché, et faire en sorte que les bâtiments que nous imaginons aujourd'hui ne soient pas obsolètes dans une dizaine d'années.

1 - selon le scénario A2 du GIEC, les températures de l'hexagone, à la fin du siècle, augmenteraient selon un gradient NO-SE de 3°C en littoral atlantique à 4°C au SE d'une ligne Strasbourg-Toulouse

Techniquement, ces solutions existent et sont déjà mises en œuvre sur un certain nombre de bâtiments en France métropolitaine et dans les pays voisins, mais aussi plus largement dans les pays du Sud qui connaissent déjà des conditions climatiques d'été rigoureuses et un accès à l'énergie difficile. Les principaux obstacles au développement de ces techniques passives ne sont donc pas techniques mais culturelles et réglementaires.

Culturels d'abord

Si on examine le développement de la climatisation sur les dernières décennies, on constate qu'un certain standard de confort s'est d'abord imposé dans les surfaces commerciales et les bureaux, certes justifié par une inflation incontrôlée des charges internes (éclairage, bureautique, équipements...), mais aussi des apports solaires favorisés par la mode architecturale du tout vitré sans protection solaire. Puis ont été atteints d'autres secteurs, dans lesquels les justifications sont moins évidentes : l'automobile, le logement... Aujourd'hui, la chaîne du froid est assurée, de la maison au bureau en passant par la voiture. Au nom de la modernité et d'un certain statut social, un standard de confort s'est imposé chez nous et a remplacé d'autres conceptions du confort qui préexistaient. Et pourtant, la climatisation n'équipe qu'une part minime des bâtiments dans le monde et, là où elle est pratiquée, le confort qu'elle est sensée offrir est loin de faire l'unanimité.

Réglementaires ensuite

La victoire de ce standard a été largement favorisée, comme toujours, par l'arsenal normatif. Les débats qui avaient accompagné la naissance de la norme 7730², dans les années 60 se sont éteints par KO. Celle-ci est devenue la référence universelle sous tous les climats et dans tous types de bâtiments : c'est elle qui s'impose dans tous nos cahiers des charges. Il a fallu attendre la première décennie de ce siècle pour voir une évolution du contexte normatif adapté aux conditions d'été et aux

bâtiments non climatisés, avec le confort auto-adaptatif et la valorisation de la vitesse d'air. Nous disposons aujourd'hui d'un outillage normatif nouveau et adapté qu'il s'agit de faire connaître. C'est un des objets de cet ouvrage.

Les débats sur la transition énergétique sont engagés en France et dans le monde entier : au cœur des débats, les échanges d'information et d'analyse sur la question du changement climatique.

La mise en œuvre du confort d'été passif dépend donc du contexte climatologique, et des données climatologiques retenues. Il s'agit donc de baser les calculs sur les données statistiques les plus récentes. Il ne nous apparaît pas pertinent de dimensionner les projets sur des situations extrêmes, même si celles-ci devraient se multiplier. Il est sans doute préférable de rechercher et anticiper pour ces périodes, des solutions « palliatives » : modification des horaires, mise à disposition d'une salle rafraîchie...

Nous verrons que cette conception du confort d'été passif implique des arbitrages « été/hiver » et une approche globale, dès la conception, qui va de l'environnement extérieur à l'aménagement et à l'utilisation du bâtiment, dans une logique vertueuse. L'approche proposée et les solutions développées s'inscrivent dans une gestion responsable, et sur le long terme, du patrimoine naturel, bâti et culturel, mais aussi dans une approche critique de la croyance en la toute-puissance technique.

Les informations et points de vue exposés dans ce guide résultent du travail critique de mise en commun d'expériences de professionnels impliqués dans leurs pratiques, qui n'hésitent pas à débattre à ce propos et à mettre à disposition leur savoir-faire.

2 - NF ISO 7730, la norme actuelle de référence sur le confort thermique



2. Le confort thermique

2.1 - Les paramètres du confort thermique

La thermorégulation humaine

La thermorégulation comporte une dimension comportementale et une autre physiologique. Outre leur rapide description, nous allons approfondir quelque peu l'interaction entre ces deux dimensions et les conséquences en termes de recommandations pour la gestion du confort d'été en contexte bâti. Cette analyse s'appuie largement sur les travaux en psychologie cognitive et comportementale menés, entre autres, par Jacques Fradin et l'Institut de Médecine Environnementale.

Elle est d'abord comportementale...

Comme tout animal, l'être humain sait naturellement réguler sa température en adaptant ses comportements. Ainsi, en contexte chaud, il va rechercher l'ombre et le frais, s'hydrater, se ventiler, réduire son activité ou même, parfois, la suspendre par une sieste au plus chaud de la journée. En milieu plus urbain, il pourra en outre alléger ou aérer son habillement, ou mettre des protections contre le rayonnement solaire, comme des chapeaux et des habits légers...

L'être humain (au-delà des régions subtropicales africaines dont il est issu) s'est peu à peu installé dans des contrées plus inhospitalières pour lui, désertiques ou au climat plus froid ou contrasté...

Pour se protéger, principalement du froid hivernal et/ou nocturne, il a appris à créer des habitats artificiels, d'abord dispersés puis regroupés (hameaux, bourgs, villes). Or l'environnement urbain contemporain force souvent

à la réclusion prolongée dans des bâtiments plus ou moins équipés pour faire face à la chaleur (ils le sont surtout face au froid), et, ceci, notamment aux heures les plus chaudes de l'été et de la journée. Outre l'habitat, les conditions de travail se sont considérablement transformées avec l'industrialisation et la vie de bureau (horaires imposés, tenues professionnelles de rigueur, postes de travail souvent fixes, cadences soutenues).

À l'inverse, les habitats et les modes de vie ruraux traditionnels permettent ordinairement de changer d'exposition ou d'étage, de sortir et même de gérer son rythme de travail et de vie en fonction de l'environnement.

En bridant fortement l'adaptation comportementale spontanée, tant spatiale (poste de travail fixe, appartements non traversant...) que temporelle (horaires de travail, rythmes sociaux...), les environnements et modes de vie contemporains imposent soit une adaptation physiologique qui se révèle souvent pénible ou inconfortable comme nous allons le voir, soit une gestion thermique du bâtiment, qui, si elle n'est pas prise en compte dès la conception, induit une réponse énergivore et polluante : la climatisation !

Et comme notre système nerveux est naturellement programmé pour rechercher le moindre effort, il nous poussera naturellement, entre inconfort et confort, vers le second choix : celui de la climatisation. Il faut donc tout faire pour réduire ce dilemme cornélien, entre « satisfaire son confort individuel immédiat » et « éviter le changement climatique de demain », ceci en :

- > redonnant plus de liberté d'adaptation comportementale aux individus, notamment

en situation de travail. Le devoir de conseil des programmistes, AMO, ou architectes concerne aussi l'usage des bâtiments durables, par exemple l'habillement, la gestion des horaires et des lieux...

- > aménageant des espaces de travail ou de vie plus naturellement confortables, c'est à dire bioclimatiques, sans avoir besoin d'un recours à la climatisation.

De ce point de vue, l'exemple du Japon post-Fukushima est instructif. Contraints par une baisse drastique d'électricité due à la fermeture des centrales nucléaires, les japonais ont bien été obligés de remettre en cause certains standards d'habillement ou d'horaires.

La régulation physiologique n'intervient qu'en dernier recours...

La thermorégulation physiologique porte sur les effets physiques modifiant les échanges entre le corps et son environnement : frissons ou transpiration, vasoconstriction ou vasodilatation selon qu'on combat le froid ou le chaud. Quant à la température du corps, elle dépend fortement de l'activité : un individu au repos produira moins de chaleur que celui qui travaille ou celui qui pratique une activité physique intense.

La régulation physiologique est un phénomène relativement nouveau à l'échelle de l'évolution des espèces, puisque les animaux à sang froid ont largement précédé ceux à sang chaud. La thermogenèse (animaux à sang chaud) est un acquis « récent » de l'évolution, qui a permis l'élargissement du biotope des espèces concernées, dont la nôtre.

La sudation, qui permet d'abaisser la température grâce à la réaction endothermique³ de l'évaporation de l'eau, est d'apparition récente. De nombreux mammifères et les oiseaux ne transpirent pas, sinon par la langue et la respiration, qu'ils accélèrent pour se rafraîchir !

Pour précieuse qu'elle soit, cette adaptation physiologique au chaud et au froid n'intervient donc qu'en second lieu. Nous restons des

lézards « par défaut », qui cherchent le soleil (ou mettent un pull-over) pour se réchauffer, avant d'être des animaux thermorégulés ! La régulation physiologique n'intervient qu'après dépassement ou inhibition de nos capacités de réponse comportementale.

Donc :

- > L'être humain est naturellement mieux équipé pour supporter le chaud que le froid (même s'il existe des différences psychologiques voire physiologiques inter-individuelles.
- > L'adaptation physiologique est coûteuse car elle nous fait perdre de l'eau et des minéraux et ralentit les métabolismes énergétiques (afin surtout de limiter la production de chaleur), elle est donc ressentie comme fatigante...
- > D'une façon générale, l'adaptation comportementale est donc plus économe que le recours physiologique. Spontanément, nous la préférons car elle demande moins d'effort.

On comprend mieux pourquoi la climatisation, qui est d'abord un produit des modes de vie modernes, induit, en retour, des comportements de passivité puisqu'elle nous dispense de prendre d'autres précautions, comportementales, sociales et architecturales !

Les facteurs psychosociologiques du confort

Mais l'efficacité de la thermorégulation n'est pas qu'un équilibre physique mécanique. Elle dépend aussi, et grandement, de l'état psychosociologique dans lequel se trouve l'individu s'autorégulant.

Le stress réduit la tolérance à la chaleur

La tolérance à la chaleur est dégradée par la présence conjointe d'autres facteurs négatifs. Ainsi, le stress réduit cette tolérance. Et le stress redevient omniprésent, notamment parce que notre monde occidental (re)découvre le changement permanent pour ne pas dire l'instabilité, l'incertitude voire l'insécurité...

3- réaction qui nécessite un apport d'énergie donc produit du froid

Or le stress augmente nos métabolismes énergétiques pour faire face au danger, ce qui nous rend dans le même temps plus intolérant à la chaleur.

Le milieu professionnel, grand producteur de stress, est aussi un environnement que l'on subit. À l'inverse, en vacances où l'on est, si l'on peut dire, plus calme et « consentant », on supporte bien plus facilement la chaleur, et certains même la recherchent. Il faut dire que la chaleur auto-infligée, parfois extrême (par exemple sur la plage en plein cœur de journée), est présentée comme symbole de vacances et de détente, ce qui montre à l'envi que le « bonheur » est parfois bien différent du plaisir physiologique...

L'adaptation en tant que mode mental

Nos sensations de confort et d'inconfort ne relèvent pas seulement de notre physiologie ou même de nos émotions et de notre culture. Elles mettent aussi en jeu nos capacités d'adaptation individuelles, qui nous permettent par exemple d'affronter un désagrément, de nous priver d'un plaisir immédiat parce que notre raison nous en éclaire quelques inconvénients cachés ou potentiels. Or le mode de pensée adaptatif n'est pas seulement raisonnable et parfois... frustrant, il modifie surtout notre perception même du plaisir et du déplaisir et de nos relations sociales. Ainsi, il nous rend davantage capable de nous individualiser, de transformer un obstacle en opportunité, de découvrir d'autres formes de plaisir, comme la créativité, l'approfondissement, le dépassement de soi...

Pourtant, cette précieuse capacité, qui est au cœur de la créativité et de la richesse des cultures humaines, n'est pas totalement innée. Nous portons tous en nous cette potentialité mais nous n'y accédons qu'au travers d'une préparation culturelle, entre science, psychologie, philosophie et sagesse populaire...

D'après les travaux concernant les modes mentaux dirigés, entre autres, par J.S. Evans (Université de Plymouth) ou K.R. Ridderinkhof (Université d'Amsterdam), notre cerveau est en « bascule » entre deux grands modes de fonctionnement ou « modes mentaux », qui constituent deux facettes à la fois complémentaires et opposées de son fonctionnement. L'un, dit mode mental automatique, gère avec succès les situations connues et maîtrisées. L'autre est plutôt spécialisé dans la gestion des situations inconnues et à risque. Notre cerveau fonctionne à « l'économie » et sollicite en premier lieu les processus automatiques. Le problème survient lorsque ces processus sont maintenus alors qu'ils ne sont pas adaptés à la situation.

L'adaptation dépend aussi de la motivation

Par ailleurs, la littérature scientifique⁴ relie souvent les attitudes et comportements environnementaux, d'une part, et les valeurs, d'autre part. Ainsi, l'adhésion à une norme sociale pro-environnementale, par exemple la consigne d'hiver à 19°C, est positivement associée aux valeurs de dépassement de soi, tandis que la prise de recul par rapport à cette norme est positivement liée aux valeurs d'affirmation de soi. Mais, le discours moralisateur ne semble pas marcher (ce qui explique au moins en partie les résultats limités des politiques de conscientisation ou de dramatisation). Seules les motivations profondes (constitutives de nos préférences spontanées et idéaux) ou la conviction personnelle, qui donnent son sens à notre vie et nous assurent une vie sociale équilibrée (que l'on peut confondre avec les « valeurs » plus rigides et dont on a hérité), permettent de trouver l'énergie d'anticiper et d'agir dans le long terme (projets, visions...).

4 - Pourquoi être pro-environnemental ? Une approche sacionormative des liens entre valeurs et « pro-environnementalisme », M. Becker, M.-L. Félon-neau, Société française de psychologie. Elsevier Masson SAS, 2009

Les paramètres d'ambiance

Les paramètres décrits plus haut sont du domaine de l'usage et de la vie du bâtiment. Ils dépendent de l'occupant. Les paramètres d'ambiance sont les seuls paramètres sur lesquels peuvent agir les concepteurs.

Les températures

La température de l'air et la température des parois créent les conditions des échanges thermiques entre le corps humain et l'ambiance. On peut agréger ces deux températures en un seul paramètre, la température opérative (ou température résultante). En première approximation et pour des vitesses faibles, elle peut être calculée comme la demi-somme des 2 températures d'air et de paroi.

L'humidité de l'air

Elle crée les conditions des échanges thermiques par évaporation cutanée. Elle s'exprime habituellement en humidité relative HR, rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température de cet air et la quantité maximale d'eau que peut contenir l'air (saturation) à cette même température. La plage de confort est suffisamment large, de 30 % d'humidité relative à 70 %, de sorte qu'en climat tempéré, l'humidité est rarement un facteur déterminant du confort.

La vitesse de l'air

Elle favorise l'évapotranspiration et les échanges thermiques par convection. Ce faisant, la vitesse d'air abaisse la température de surface, ce qui est intéressant en été mais gênant en hiver. Cet effet n'est vraiment sensible qu'au-dessus d'une vitesse de 0,20 m/s.

Les paramètres d'inconforts localisés

Ils sont liés à l'hétérogénéité des ambiances. Ce sont :

- > l'inconfort par asymétrie de rayonnement. Il provient d'une trop grande différence de température de rayonnement de paroi de chaque côté du corps. En condition d'hiver une paroi froide (fenêtre mal isolée) dont la température de surface serait de 10 à 12°K inférieure à celle des parois du local, peut créer un tel inconfort. En condition d'été, il faudrait une

différence de température beaucoup plus importante pour qu'il y ait le même inconfort,

- > le gradient vertical traduit la différence de température entre la tête et les pieds. Mesuré entre 0,10 m et 1,10 m, un gradient de plus de 3°K est source d'inconfort,
- > la température de sol doit être normalement comprise entre 19 et 26°C pour ne pas créer d'inconfort.

2.2 - Les modèles du confort thermique

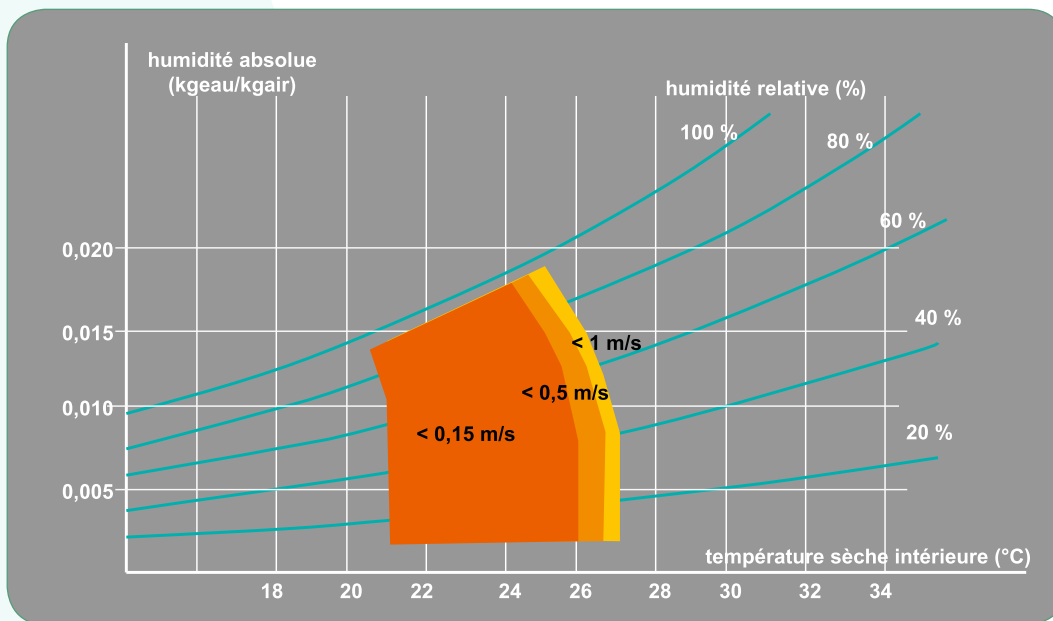
Les standards, les normes et les modèles de calcul ont accompagné, et même encadré, l'évolution de la notion de confort.

Aujourd'hui, le contexte environnemental a changé et cette notion « moderne » du confort se trouve en décalage avec les enjeux environnementaux. Une évolution des normes est amorcée depuis quelques années. Elle est encore peu visible dans les milieux professionnels de l'ingénierie et de la maîtrise d'ouvrage. L'objet de ce chapitre est de la faire connaître.

Le modèle de Fanger

Le modèle de Fanger traduit l'équation de l'équilibre thermique du corps humain. Il combine les paramètres d'ambiance cités plus haut (température d'air, température de paroi, humidité de l'air, vitesse de l'air) aux paramètres de comportement (habillement, activité) pour calculer **un indicateur de confort** représentant l'avis moyen d'un groupe important de personnes qui exprimerait un vote de sensation de confort thermique. Cet indicateur, le **PMV (Predicted Mean Vote)**, se mesure sur une échelle de sensation thermique à 7 niveaux. Le modèle a été conçu en confrontant les équations physiques avec des expériences réalisées en chambre climatique. Il a été validé, à la fin des années 70 par enquête statistique sur un grand nombre de personnes (500) placées dans des conditions thermiques données. Il permet de mesurer une sensibilité à différents paramètres comportementaux et d'ambiance.

Plages de sensibilité à la vitesse d'air correspondant à un PMV compris entre -0,5 et +0,5



Source : TRIBU - traitement à partir de la norme 7730

Selon le modèle de Fanger, des conditions optimales de confort (PMV compris entre -0,5 et +0,5) sont obtenues sur une plage de température d'environ 21°C à 26°C dans des conditions classiques de travail de bureau d'été. Le modèle est très sensible à l'habillement (4°C de différence entre une tenue d'hiver et une tenue d'été), à l'activité (6°C et plus entre une activité sédentaire et une marche sportive) et à l'humidité : une baisse d'environ 2°C de la zone de confort pour une humidité relative passant de 40 % à près de 100 %. Par contre, une vitesse d'air passant de 0 m/s à 1 m/s n'autorisera qu'une augmentation de 1°C de la plage de confort.

Sur le modèle de Fanger a été construite la norme NF EN ISO 7730 qui est en vigueur aujourd'hui. Cette norme reprend les équations de Fanger pour le calcul du PMV et fixe des classes de PMV rapportées à 3 classes de confort A, B et C. La classe A (PMV compris entre -0,5 et +0,5) est la plus souvent retenue.

La norme introduit 2 notions nouvelles :

- > le PPD (Predicted Percentage Dissatisfied), pourcentage prévu de personnes en situation d'inconfort, pour lequel Fanger avait défini une corrélation avec le PMV,
- > des indicateurs d'inconforts locaux basés sur les turbulences (DR) ou les différences locales de températures (PA).

Les modèles de confort adaptatif

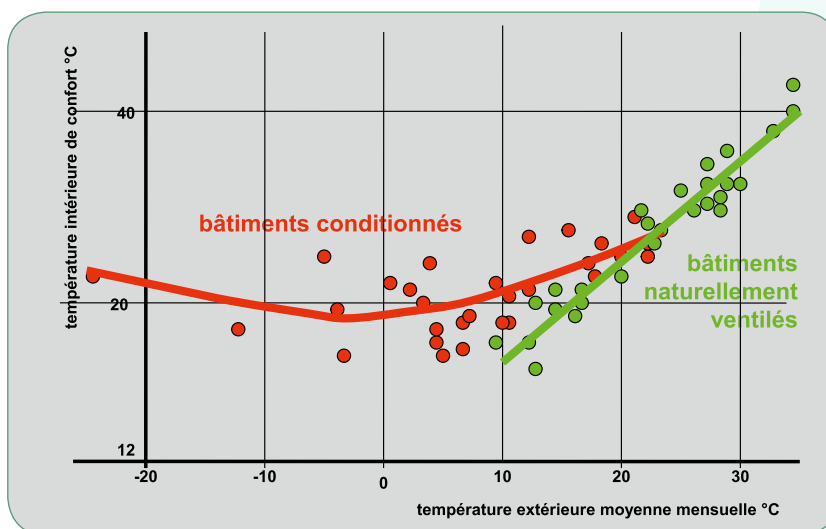
Au début des années 2000, des travaux de l'ASHRAE⁵ montrent que le modèle de Fanger est valable, en été, pour les bâtiments climatisés mais pas du tout dans les bâtiments ventilés naturellement. En France, le laboratoire PHASE de l'Université Paul Sabatier à Toulouse rejoint ces travaux et montre que la perception du confort thermique découle aussi d'une appréciation affective d'un ressenti, et pas seulement d'un

5 - L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, association des ingénieurs climaticiens des États-Unis, établit les règles de calcul aux USA et dans de nombreux autres pays du globe

déterminisme entre confort et conditions comportementales et d'ambiance. Cette approche, dite du « confort adaptatif », démontre que la sensation de confort dépend aussi de l'adaptation d'un individu à son environnement.

Ces travaux ont notamment montré que, dans les bâtiments ventilés naturellement, la température extérieure, quand elle est plus élevée en été, prédispose les individus à une faculté d'adaptation accrue.

Corrélation entre la température de confort et la température extérieure



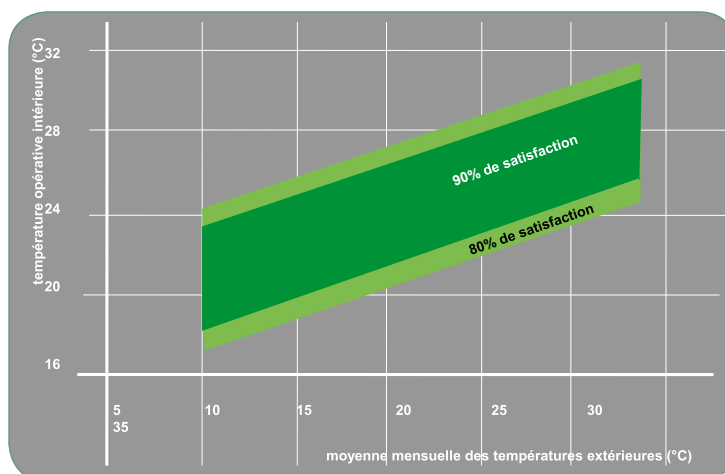
Source : ASHRAE

Le modèle adaptatif a servi de base à l'évolution de divers standards internationaux :

Le standard ASHRAE 55 de 2004

L'ASHRAE propose, en 2004, une correction de la zone de confort en fonction de la température extérieure moyenne mensuelle.

ASHRAE 55 2004



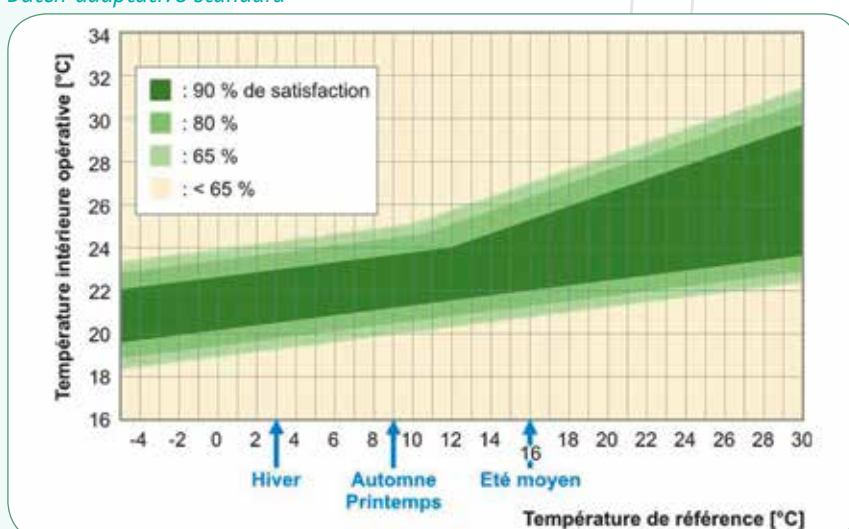
Source : ASHRAE - en ordonnées la température opérative. En abscisse, la température moyenne extérieure mensuelle

Le Dutch adaptive standard (Pays-Bas)

Il prend comme référence à l'adaptativité la moyenne glissante des températures exté-

rieures sur la dernière semaine mémorisée par l'individu.

Dutch adaptive standard



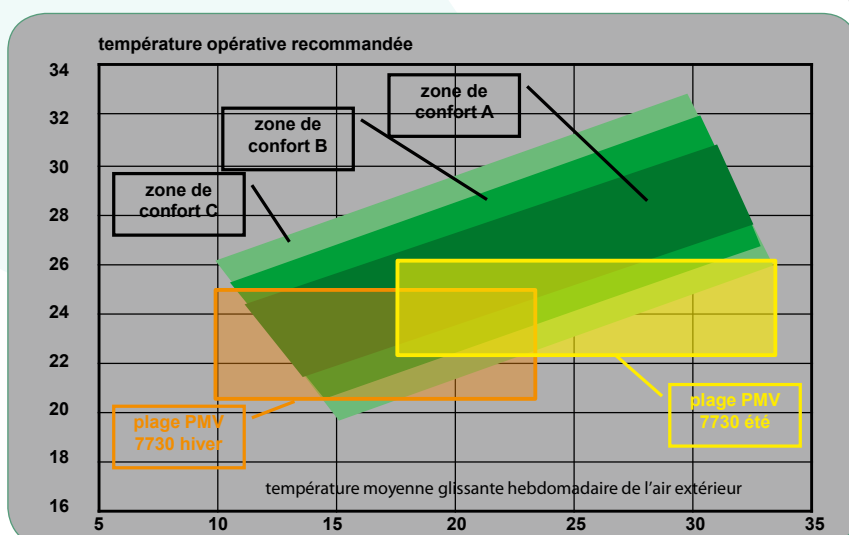
Source : Bruxelles Environnement

La norme européenne EN 15251 de 2007

Applicable aux bâtiments ventilés naturellement, elle fait évoluer la 7730 et le strict calcul selon Fanger du PMV. La plage centrale (zone de confort A) correspond à un PMV compris entre -0,5 et +0,5. Une telle approche du confort

adaptatif, appliquée à la semaine caniculaire d'août 2003, aurait donné comme plage optimum de confort (plage A) la plage [25 – 31°C]. Alors qu'une stricte application de la norme 7730 limite cette plage A à [22 – 26°C].

EN 15251 2007



Source : TRIBU à partir de la norme EN 15251

Les modèles de la vitesse d'air

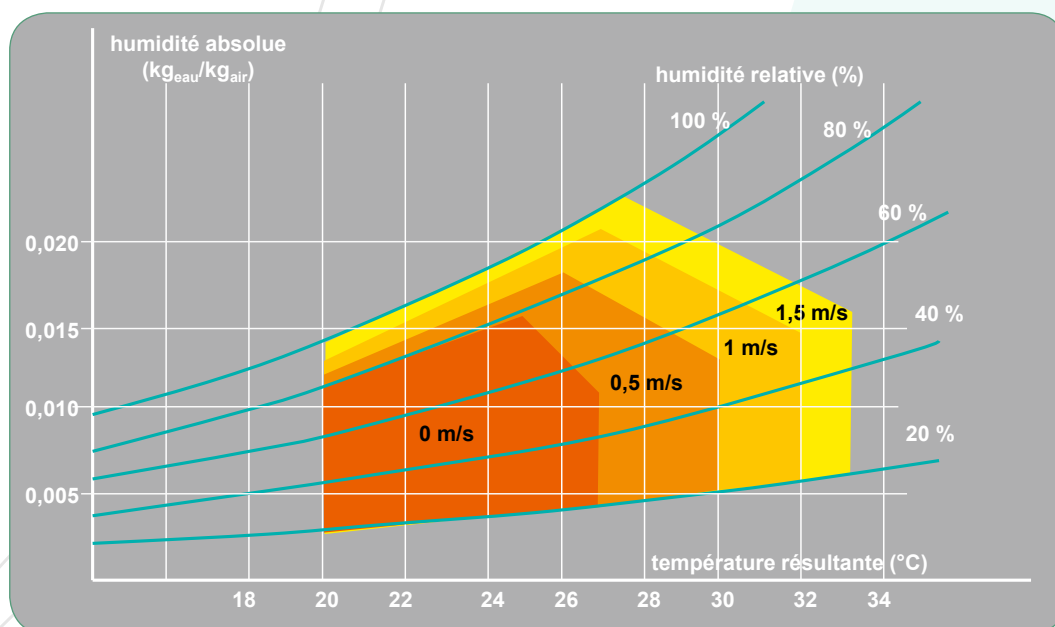
En confort d'été, et pour les bâtiments non climatisés, la principale limite du modèle de Fanger est sa sensibilité à la vitesse de l'air qui a toujours, quelle que soit la température, un impact négatif (au mieux neutre au-dessus de 32°C) sur le confort.

Cet inconfort, lié à des vitesses d'air supérieures à 0,2 m/s, est réel en conditions d'hiver et de chauffage, soit pour des températures opératives inférieures à 25°C. Ce n'est plus vrai pour des températures plus élevées. Au contraire, en facilitant l'évapotranspiration et en éliminant la « mouillure cutanée », des vitesses d'air plus élevées sur la peau améliorent le confort. C'est l'effet « brise d'été ».

Le modèle de Givoni

Établi par Burach Givoni à peu près à la même époque que le modèle de Fanger, ce modèle de détermination du confort thermique intègre l'évapotranspiration. Issu de ce modèle, le diagramme de Givoni, établi pour une activité sédentaire et avec un habillement adapté à l'été, définit, sur le diagramme de l'air humide, des zones de confort correspondant à différentes plages de vitesse d'air (jusqu'à 1,5 m/s, vitesse au-delà de laquelle un risque de nuisance existe). Largement utilisé en Amérique du Sud et dans les DOM TOM, il a fait l'objet d'études récentes menées par le laboratoire PIMENT de l'Université de la Réunion et revalidé par une série d'enquêtes sur un bâtiment non climatisé (IUP de Saint-Pierre).

Le diagramme de Givoni



Source : TRIBU

La plage 0 m/s correspond aux modèles de confort classiques (valables jusqu'à 0,20 m/s). La plage 0,5 m/s peut être atteinte avec des dispositions de ventilation naturelle.

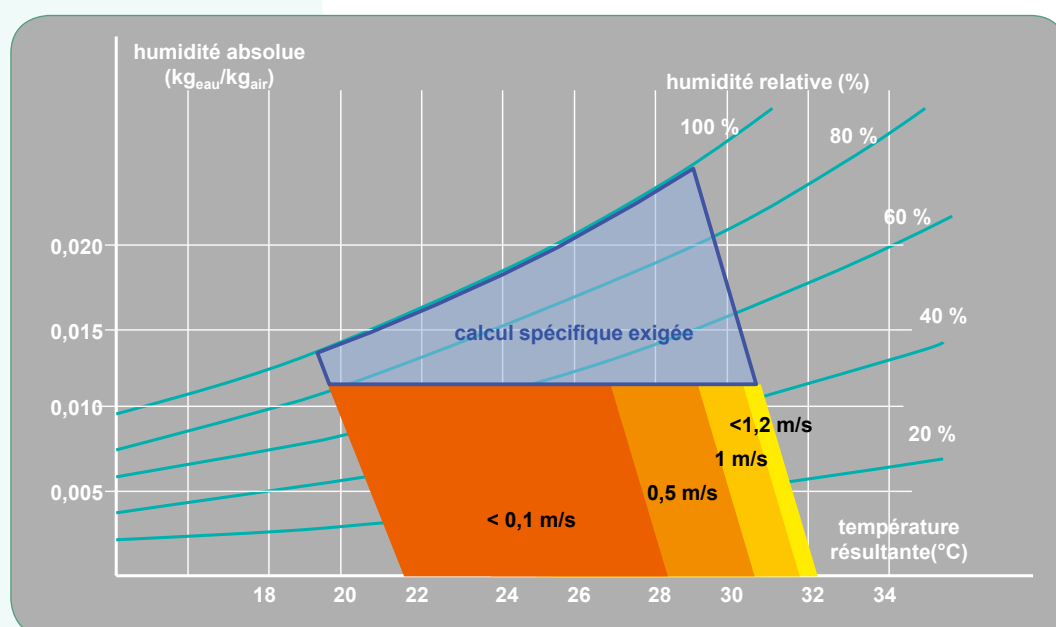
Les vitesses supérieures ne peuvent être atteintes que grâce à des dispositifs mécaniques (brasseurs d'air), dans le cadre des plages de vitesse confortables décrites plus haut.

Le standard 55-2009 de ASHRAE

Les règles ASHRAE de 2004 ont récemment évolué, en 2009, en intégrant la prise en compte de la vitesse d'air dans la détermination du confort thermique pour les bâtiments non climatisés.

Elles reprennent sensiblement les plages de confort de Givoni pour les humidités relatives faibles et modérées.

Standard ASHRAE 55 2009



Source : TRIBU

Les conseils de l'ICEB

L'ICEB encourage la conception de bâtiments entièrement non climatisés dans les climats tempérés ou l'extension des périodes de non climatisation dans les bâtiments climatisés en climat chaud.

Le travail sur la vitesse de l'air, combiné aux efforts sur la réduction des charges internes et externes, permet d'obtenir le confort sur des plages de températures plus larges et élargit d'autant le domaine des solutions passives.

Pour les calculs de justification, et notamment les simulations thermiques dynamiques, le diagramme de Givoni, déjà largement utilisé dans les DOM-TOM, est à privilégier.



3. Le climat

3.1 - Les données climatiques

Quelles données climatiques ?

Il n'y a pas de conception dite bioclimatique sans une connaissance rigoureuse des données climatiques locales du projet considéré. Le degré de caractérisation locale d'un climat peut varier en subtilité, selon le zonage climatique et le nombre de stations de mesures disponibles dans un pays donné.

Il s'agit de bien connaître l'évolution des données classiques de température sèche de l'air, de l'humidité et donc des variables associées importantes comme la température humide ou la température de rosée, la vitesse et direction du vent, le rayonnement solaire direct et diffus et la pluviométrie. De plus, indirectement défini par les variables décrites ci-dessus, la température du sol au contact du bâtiment est également une condition limite importante à estimer correctement. Enfin, en parallèle des données de rayonnement solaire, les données de luminosité extérieure sont également importantes pour évaluer l'éclairement naturel dans les locaux.

Il existe deux types fondamentaux de données climatiques : les données dites représentatives, généralement pour une période trentenaire, et dérivées de mesures et d'algorithmes. Et puis il y a les séries de données mesurées sur une certaine période de temps. L'usage de ces deux formats est différent. Les données représentatives sont utilisées en conception et par suite pour réaliser des estimations de besoins, consommation et confort. Les données mesurées peuvent être utilisées dans le cadre d'un contrat de performance énergétique avec protocole strict de mesure et vérification.

Ces données mesurées sont souvent incomplètes et nécessitent des extrapolations pour « remplir les trous » qui peuvent aussi être remplacés par des extraits du fichier représentatif.

La température du sol est indirectement une donnée climatique et il est important de bien la définir, en particulier pour des projets RDC ou R+1 de plain-pied pour lesquels la contribution thermique relative du plancher bas peut devenir importante. Il est recommandé d'effectuer un calcul en différence finie pour déterminer ce paramètre de façon rigoureuse.

Sources et présentation des données

Les données climatiques sont aussi caractérisées par leur fiabilité. La notion de source de la base de données climatique utilisée est cruciale. De nombreuses bases de données par pays existent. Parmi les sources de données internationales considérées comme fiables, on peut citer **IWEC (International Weather for Energy Calculations)** ou **SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment)**. La base de données suisse METEONORM, basée sur 8 000 stations réparties sur la planète, représente une bonne compilation de données météo.

Le plus souvent, les sources de données météo se distingueront plus par la façon dont le rayonnement solaire est modélisé que par les DJU (Degrés Jour Unifiés). Ces derniers présentent en effet généralement une bonne homogénéité entre les divers formats de données. En revanche, nous avons déjà observé de grandes différences sur la répartition entre la part directe et diffuse du rayonnement solaire entre des formats IWEC et des formats SWERA. Cela est important à considérer quand on veut dimensionner des protections solaires ou des systèmes solaires photovoltaïques ou thermiques. Il n'est pas question ici de « départager » ces formats, mais bien de mettre l'accent

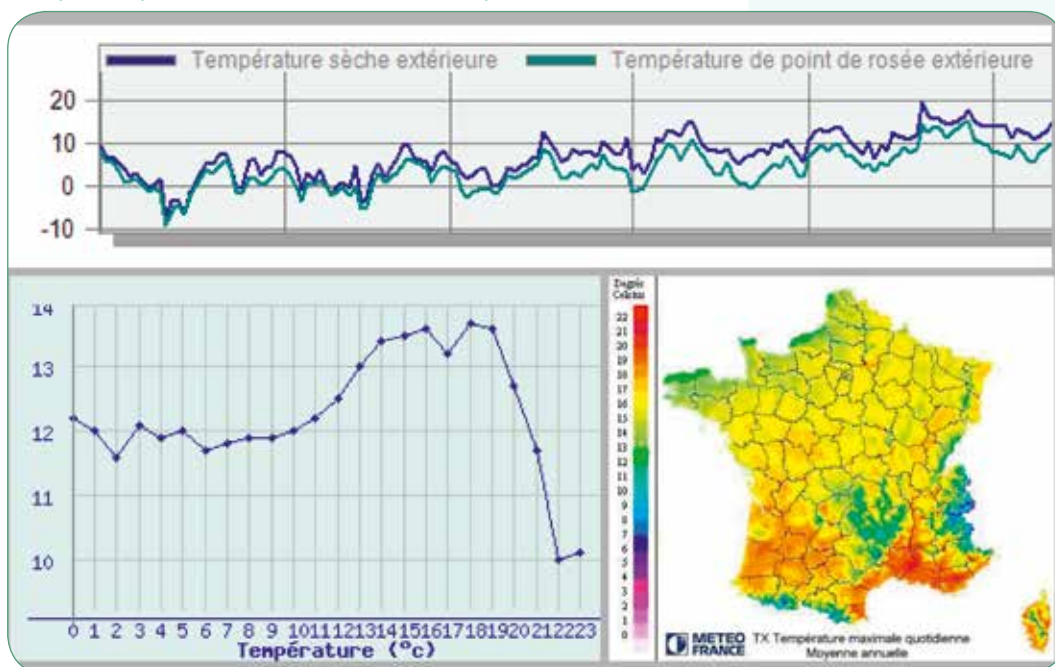
sur le fait que les concepteurs doivent être conscients des caractéristiques des formats de données utilisés et doivent toujours préciser dans leurs rapports l'origine des données climatiques utilisées.

Les données sont disponibles sous forme de séries horaires, quotidiennes, mensuelles et annuelles et présentent diverses statistiques

utiles pour caractériser le climat. Les données climatiques peuvent être présentées sous diverses formes dont les plus classiques sont :

- > diagramme chronologique (graphique),
- > tableau,
- > histogramme,
- > courbes de fréquences cumulées,
- > cartographie.

Exemples de présentation de données climatiques



Relevés en temps réel disponibles sur internet (données horaires), fichier climatique représentatif (données quotidiennes), cartographie française des températures représentatives - Source : Météo France

Exemples de statistiques

Statistiques mensuelles de température sèche pour la station PARIS / ORLY												
	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Max	13,5	11,3	17	22	26,3	26	30	30	27,5	22,7	15	13,2
Jour/heure	14/16	3/19	13/15	21/17	26/16	22/15	2/14	5/16	1/16	15/16	1/16	2/16
Min	-5,2	-4	-1,5	0,8	6	7	10	9	6,9	1,1	-1,1	-6
Jour/heure	27/3	18/8	3/7	1/6	4/5	5/5	19/5	2/5	18/4	5/4	29/7	30/8
Moyenne quotidienne	3,9	4,2	7	10	14,3	16,8	19,4	19,7	15,7	11,3	6,4	4,5

Source : IWECC

Les données climatiques s'utilisent sous diverses fréquences selon les caractéristiques que l'on cherche à étudier. Par exemple :

- > Les données annuelles sont souvent utilisées comme des sommes, par exemple pour évaluer le gisement solaire pour les énergies renouvelables ou le solaire passif.
- > Les données mensuelles sont usuellement utilisées pour caractériser les températures et humidités d'un lieu. Elles sont aussi utilisées pour le rayonnement solaire dans les méthodes simplifiées d'évaluation du gisement solaire.
- > Les données quotidiennes sont typiquement utilisées pour la définition des degrés-jours, qui servent à faire une estimation simplifiée des besoins de chauffage et caractérisent jusqu'à un certain degré les besoins de climatisation.
- > Enfin les données horaires sont utilisées dans les simulations thermiques dynamiques et sont également des données indispensables pour identifier les maxima et minima d'un lieu. On peut également en extraire n'importe quelle statistique désirée lors des études.

3.2 - Les corrections aux données des stations météo

L'impact du réchauffement climatique sur la pratique professionnelle

La question de savoir s'il faut prendre en compte le réchauffement climatique ou non pour l'estimation ajustée des températures de l'air revient souvent durant les projets et ne fait l'objet d'aucun consensus. En fait cette interrogation cache deux problématiques différentes :

- > celle de l'augmentation régulière des moyennes climatiques, déjà constatée et qui perdurera dans les années à venir,
- > celle de la prise en compte des périodes caniculaires.

Le premier effet doit être intégré dans les études au fur et à mesure de la fourniture de données statistiques suffisantes. Il s'agit donc de baser les calculs sur les données statistiques les plus récentes. Par contre dimensionner sur des conditions caniculaires pour assurer un confort « classique » conduit à l'interdiction des solutions passives et au surdimensionnement des installations de rafraîchissement. Deux conséquences aujourd'hui non supportables pour la planète. On ne peut dimensionner sur des situations extrêmes, même si celles-ci vont se multiplier. Il est sans doute préférable de rechercher, pour ces périodes, des solutions « palliatives » : modification des horaires, mise à disposition d'une salle rafraîchie...

En revanche, il peut toujours être intéressant de vérifier comment une solution, dimensionnée dans des conditions climatiques plus normales, se comporte en période de canicule. La manipulation pour « simuler » le réchauffement climatique dans les fichiers météorologique est relativement simple, encore faut-il utiliser des données qui correspondent à la réalité. Pour un projet de rafraîchissement naturel, la période caniculaire de l'été 2003 constitue un modèle satisfaisant d'une météo avec réchauffement climatique.

Lorsque les températures sont modifiées au sein d'un fichier climatique, il ne faut pas perdre de vue que ce dernier est un ensemble de variables qui doivent rester cohérentes entre elles. Ainsi, une modification de la température sèche de l'air entraîne également une modification manuelle de la température de rosée si aucune hypothèse de changement n'est faite sur l'humidité spécifique du lieu. Un changement de température à humidité spécifique constante entraîne un changement d'humidité relative. Ne pas faire ces changements entraînera notamment des problèmes de simulation thermique.

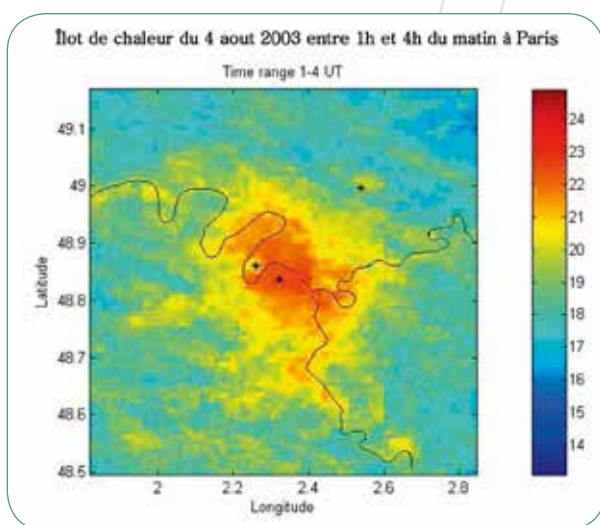
Les spécificités locales

Les considérations ci-dessus sont plutôt générales. Elles caractérisent les données obtenues à la station météo. Mais des spécificités locales peuvent modifier profondément les données météo entre la station et le projet.

L'effet d'îlot de chaleur urbain

Les températures annuelles moyennes peuvent varier de 1,5°C entre le centre-ville et les campagnes environnantes. Le 4 août 2003, en pleine canicule, on a constaté près de 6°C de différence de température entre les forêts de la grande périphérie parisienne et le centre-ville.

Îlot de chaleur urbain en Île-de-France, la nuit du 4 août 2003



Source : Météo France

Le bon dimensionnement est quelque part entre les deux, mais cet effet ne peut pas être négligé dans l'étude du confort d'été. Pour des études en milieu urbain, mieux vaut donc se baser sur une station météo située en ville. À défaut, une correction peut être calculée. Elle est proportionnelle à la distance de la limite urbaine et à la taille de la ville. On peut admettre comme valeur approchée :

$$\Delta T = \frac{D}{D_{\text{centre}}} \times \frac{3}{5} \times \log \frac{N_{\text{hab}}}{100}$$

Source : TRIBU, d'après la loi de T.R. OKE

L'altitude

Le CSTB propose la modulation suivante pour la température au niveau du sol en fonction de l'altitude : -0,4°C par 100 m en hiver et -0,7°C par 100 m en été

La proximité de la mer

Du fait de cette proximité, les amplitudes annuelle et quotidienne subissent une baisse d'environ 2°C, ce qui se traduit, pour les températures élevées d'été, par une baisse de 1,4 à 1,5°C.

Le vent

La direction et la vitesse du vent sont très souvent différentes de celles de la rose des vents de la station de mesure située à proximité. En effet, les impacts de la typologie du terrain entre la station et la ville modifient déjà ces données. L'effet peut être faible ou important, cela dépend évidemment de la « rugosité » du terrain, de ses reliefs. Une méthode simplifiée d'évaluation est fournie ci-dessous et des codes CFD (Computational Fluid Dynamics) spécifiques permettent de déterminer ces données. Mais, pour définir une approche passive du confort d'été dans laquelle le vent joue un rôle déterminant, il peut être intéressant de faire des mesures in situ.

3.3 - Le climat dimensionnant

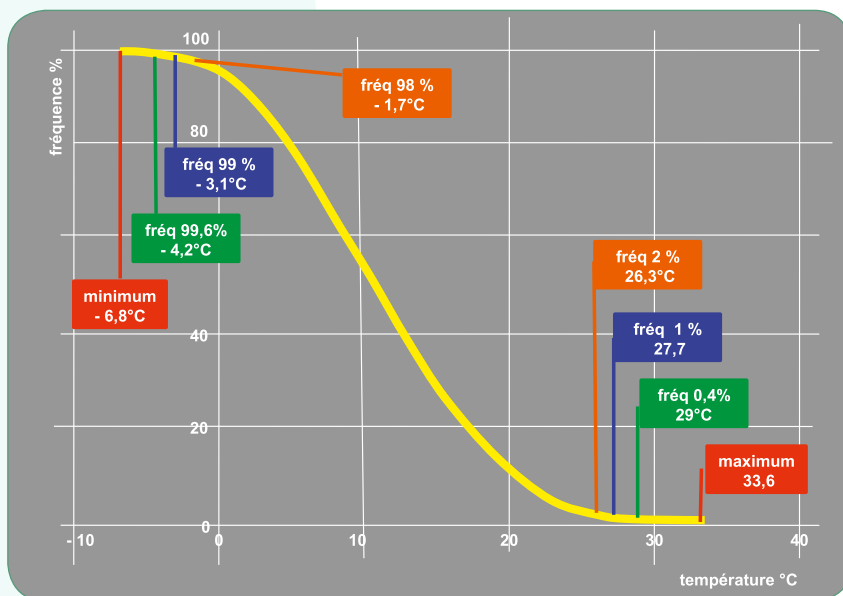
Les données climatiques sont d'abord, dans la chronologie d'un projet, des éléments dimensionnants. Cela pose la question du choix « statistique » fait pour dimensionner les dispositifs et systèmes du projet considéré.

Les pratiques courantes de dimensionnement pour la climatisation et la déshumidification décrites par l'ASHRAE (load calculation application manual) sont basées sur des grandeurs de dimensionnement correspondant à 0,4 %, 1 % ou 2 % des fréquences cumulées d'occurrence. Les standards recommandent que les températures de 1 % d'occurrence soient retenues pour les cas normaux.

Les températures de 0,4 % ou les extrêmes sont réservés à des cas exceptionnels (bâtiment qui requiert un contrôle extrême des conditions, une exigence particulière de sécurité...).

Pour un dimensionnement de rafraîchissement naturel, l'occurrence de 1 % des fréquences cumulées peut être retenue. Une vérification dans des conditions de réchauffement climatique dimensionnée avec une occurrence de 2 % est suffisante.

Les températures dimensionnantes, sur une courbe de fréquences cumulées



Source : Station de Trappes – Météo France moyenne 1996-2005

En outre, il convient de noter que certains locaux n'ont pas leur charge maximale de climatisation lors du jour le plus chaud mais lors du jour où ils reçoivent le plus d'apports solaires, ces deux jours n'étant pas nécessairement confondus selon la proportion de vitrage et l'orientation. De plus, le pic de température intérieure ou le pic de charge ne coïncide pas

forcément avec le pic d'apports solaires transmis ou le pic de température extérieure. Tout dépendra de l'inertie du local et des autres apports internes. Seule une simulation thermique dynamique permet de déterminer précisément la valeur de ces pics et leur heure d'occurrence et ce, local par local.

Les conseils de l'ICEB

- > Choisir avec soin sa base de données et préciser l'origine des données dans le rapport ;
- > Travailler sur les statistiques les plus récentes ;
- > Prendre en compte les adaptations locales et les épisodes climatiques fréquents (altitude, bord de mer, îlot de chaleur) ;
- > Recaler systématiquement les données vent ;
- > Dimensionner les projets courants sur des données extrêmes de fréquence n'excédant pas 1 %.



4. Les solutions architecturales et techniques

Bien des raisons ont conduit à la réalisation de ces gouffres énergétiques que représente une bonne partie de la production des bâtiments des années gaspillage. Parmi ces raisons, la croyance dans la toute puissance de la technique occupe une place privilégiée. Un système de climatisation énergivore permettait de ne pas se soucier des orientations qui contrariaient l'ordonnancement urbain, de ne pas se priver de grande baies vitrées et de transparence et, au contraire, d'éviter les protections solaires qui brouillent la lecture de la façade ... C'est un luxe qu'on ne peut plus se permettre.

Il est temps d'inverser la tendance. Et de parler, d'abord, d'architecture responsable, qui s'enrichit du bioclimatique comme elle s'est enrichi de la découverte du béton, de l'allègement des structures ou de la raréfaction du foncier. Donner la priorité à l'architecture, c'est d'abord travailler sur l'enveloppe, l'ouvrage le plus impactant en matière de bioclimatique. Une chance, l'enveloppe est aussi souvent l'ouvrage le plus pérenne du bâtiment : intéressant pour un avenir durable. Après, quand on aura optimisé l'enveloppe dans un arbitrage choisi entre l'hiver et l'été, il sera bien temps de s'intéresser aux systèmes en commençant par les moins énergivores d'entre eux.

4.1 - L'architecture bioclimatique

L'architecture bioclimatique est celle qui optimise le fonctionnement du bâtiment sur les ressources (ou les nuisances) offertes par son environnement extérieur (température, soleil, lumière, air...). On peut aujourd'hui étendre cette liste à des phénomènes autres que ceux du climat (bruit, pollution...) En l'occurrence pour le confort d'été, c'est l'architecture qui :

- > valorisera au maximum les sources de fraîcheur permanentes dans le voisinage (végétaux, sols...), ou celles qui n'apparaissent que temporairement (la nuit),
- > utilisera au mieux les flux naturels (vent, lumière naturelle...), dans leur configuration estivale, pour couvrir les besoins de ventilation, de qualité d'air, d'éclairage naturel...

- > mais aussi assurera la meilleure protection contre la chaleur extérieure et le rayonnement solaire, voire le bruit et la pollution...

Cependant, une des principales difficultés de l'approche climatique d'été réside dans le fait qu'on ne peut pas parler d'une architecture bioclimatique d'été, indépendamment du fonctionnement du même bâtiment et des mêmes solutions climatiques en hiver et en mi-saison, ou de leur impact sur d'autres préoccupations (éclairage, qualité de l'air...). **La notion d'arbitrage est donc au cœur de la démarche bioclimatique.**

Effectivement, comme cité plus haut, l'enveloppe du bâtiment est au cœur de la démarche, puisqu'elle constitue l'interface, le filtre, entre l'ambiance intérieure et son usage d'un côté, l'environnement extérieur et ses ressources de l'autre côté. Avec la difficulté complémentaire que l'usage, comme les ressources, peuvent varier d'une façade à l'autre, d'un instant

à l'autre, et donc conduire à des solutions architecturales dynamiques dans le temps et différenciées selon les façades.

Mais, la démarche bioclimatique ne se limite pas à l'enveloppe et met en jeu tous les choix de conception. De ce point de vue, elle peut se décliner de la façon suivante :

Plan masse

La première préoccupation est de créer des îlots de fraîcheur dans l'aménagement des espaces extérieurs : plantations d'arbres, pergolas, plans d'eau, ... Tout aussi important est le choix des orientations du bâtiment par rapport aux directions les moins ensoleillées ou par rapport aux vents dominants d'été : il doit faire l'objet d'un délicat arbitrage hiver/été adapté au site et au climat spécifiques de l'opération.

Morphologie

La question se pose dès l'organisation des éléments du programme dans l'aménagement des espaces intérieurs : puisque la démarche bioclimatique est orientée, les localisations fonctionnelles selon les différentes orientations se choisissent en mettant en adéquation l'intérieur (activité, occupation, apports internes) avec l'environnement extérieur (soleil, vent, bruit, ...).

La morphologie des bâtiments impacte le confort d'été. En effet l'épaisseur des bâtiments et leur hauteur apportent des contraintes dans le maintien du confort d'été.

L'augmentation de l'épaisseur des bâtiments dégrade le confort d'été car elle impose, pour conserver un confort visuel correct, une ouverture de façade plus importante qui entraîne des apports extérieurs mal contrôlés. C'est la grande difficulté rencontrée actuellement par les bâtiments de bureaux qui n'ont plus comme choix que de rafraîchir activement pour conserver un niveau de confort acceptable. Cette augmentation de l'épaisseur réduit également la capacité des espaces à être ventilés naturellement par la façade. En effet l'accès à la façade devient alors un « luxe ». C'est ainsi

que de plus en plus de logements ne peuvent accéder à la ventilation traversante.

La hauteur des bâtiments entraîne la fermeture impérative des baies vitrées (entre autres dans les Immeubles de Grande Hauteur). Cette fermeture empêche toute ventilation naturelle. Va-t-on être obligés de climatiser les logements que la recherche de mixité fonctionnelle conduit à mettre dans ces tours ?

Enfin la morphologie en cube des bâtiments, particulièrement efficace pour réduire les déperditions énergétiques, est défavorable au confort d'été qui nécessite, lui, un accès à la façade.

La ventilation naturelle, enfin, induit, si on veut qu'elle soit efficace, des choix morphologiques particuliers : locaux ou logements traversants, succession des locaux des pièces principales aux pièces humides dans le prolongement des vents dominants, dispositifs de cheminée...

Organisation des espaces

La localisation des différentes fonctions d'un bâtiment, si elle doit correspondre en premier lieu à des besoins d'usage, doit aussi impérativement intégrer en conception le risque de surchauffe. Au-delà du raisonnement d'un zonage par fonction, nécessaire mais non suffisant, une approche confort d'été de l'organisation des espaces est impérative.

Cette question se pose particulièrement sur les espaces subissant de fortes charges internes comme une salle de classe ou un bureau. Un autre arbitrage entre confort d'été et apports solaires d'hiver doit être recherché. D'autres orientations doivent être privilégiées, comme le nord qui apporte de la lumière naturelle tout en minimisant les surchauffes.

Le besoin de ventilation naturelle d'un espace doit être correctement assuré, sa bonne localisation dans le bâtiment est donc très importante. Ainsi les salles de réunions dans les bâtiments de bureaux, souvent reléguées en second jour ne peuvent pas être ventilées correctement si elles n'ont pas un accès à la façade.

La création d'espaces tampon, comme les patios plantés, est tout à fait adaptée au confort d'été. D'autres espaces, les atriums ou les jardins d'hiver sont d'une conception beaucoup plus délicate car les avantages qu'ils procurent en hiver peuvent facilement se transformer en surchauffe dès les beaux jours.

Enveloppe

Dans la conception des façades, la transparence (part des surfaces vitrées), la solarisation (part des surfaces vitrées selon les orientations) et la porosité (part des façades ouverte à l'air extérieur) doivent faire l'objet d'un arbitrage délicat entre été et hiver, mais aussi entre confort thermique, consommations, éclairage naturel, ventilation naturelle... Les moyens de ces arbitrages sont nombreux et divers : surfaces de baies vitrées optimisées (confort d'été, éclairage naturel, isolation), choix des types de vitrages, choix de protections solaires efficaces (extérieures), adaptées à chaque orientation et chaque saison. Quelques questions sont au cœur de ces choix : fenêtre unique multifonction ou différenciation des fonctions par composants ? Dispositifs fixes ou mobiles ? C'est toute la question de la façade dynamique qui est posée.

Différents dispositifs architecturaux permettent de traiter la bioclimatique de cette peau : double peau, sur-toiture, toiture ou façade végétalisée, couleur des façades et toitures... À condition de donner à ces dispositifs une vraie fonction bioclimatique et de ne pas les considérer comme de simples marqueurs de HQE.

Systèmes constructifs

En matière de confort d'été, le choix d'un système constructif vaut surtout par son inertie thermique et l'impact de celle-ci sur le déphasage des flux de chaleur ou sur le stockage nocturne et le déstockage diurne. Cette recherche d'inertie conduit à privilégier les isolations par l'extérieur plutôt que par l'intérieur, les systèmes constructifs mixtes plutôt que les systèmes légers à ossature, ou encore à rechercher une certaine inertie (remplissage des planchers ou des murs) quand on est en système à ossature légère.

4.2 - L'environnement extérieur : créer des îlots de fraîcheur

Il est souvent plus facile de gagner quelques degrés sur les ambiances extérieures entourant le bâtiment que sur les ambiances intérieures. C'est d'abord le travail des urbanistes en maîtrisant le phénomène d'îlot de chaleur urbain à l'échelle de la ville : végétalisation des sols et des toits, toitures de couleur claire, utilisation des vents pour évacuer les surchauffes, mais aussi maîtrise des sources de chaleur (trafic automobile, condenseurs des appareils réfrigérant ...). Tout cela constitue aujourd'hui des bonnes pratiques de conception urbaine et devrait faire évoluer, dans les années à venir, les réglementations urbaines dans le sens du droit à la fraîcheur, comme par ailleurs du droit au soleil ou à la lumière.

Quelques degrés peuvent cependant être gagnés par un travail sur la parcelle afin de lutter contre l'îlot de chaleur urbain. C'est la notion de micro-îlot de fraîcheur. Les paramètres sur lesquels on peut agir sont les suivants :

> La végétalisation des abords du bâtiment.

Bien entendu un environnement végétal est toujours intéressant, mais une forte végétalisation des abords immédiats du bâtiment (les 3 premiers mètres), comportant au moins les deux strates, couvrante au sol et arborée, s'avère d'une efficacité redoutable. La végétalisation agit directement par son ombrage, et indirectement par le rafraîchissement qu'induit l'évapotranspiration des plantes.

Classification des dispositifs végétaux du point de vue îlot de fraîcheur

Espace d'intervention	Dispositif végétaux		Couverture végétale / strate végétal	Effet	
				Direct	Indirect
Toiture (Paroi Horizontale)	Toiture Végétale Intensive		herbacée		
			arbustive		
			arborée		
	Toiture Végétale Extensive		herbacée		
			arbustive		
Façade (Paroi Verticale)	Façade végétale	Revêtement	herbacée		
		Brise-soleil			
		Élément de façade	arbustive		
Sol	Arbres d'alignement		arborée		
	Masse Végétale	Parc	herbacée		
			arbustive		
			arborée		
		Jardin (Non traité dans le cadre de ce travail)	herbacée		
			arbustive		
			arborée		

Effet du dispositif sur la consommation énergétique

	significatif
	peu significatif

Source : Karina Azos Diaz (CERMA)

> **L'accessibilité aux vents.** Le vent est toujours un facteur très favorable pour toutes les techniques de rafraîchissement naturel (voir plus bas). Il favorise l'évapotranspiration du sol et des plantes et évacue les surchauffes dans les espaces extérieurs. L'accessibilité au vent dépend d'abord du tissu amont par rapport aux vents et elle est, évidemment, plus difficile en milieu urbain. À l'échelle de la parcelle, l'orientation des façades par rapport aux vents et la disposition par rapport aux masques proches sont

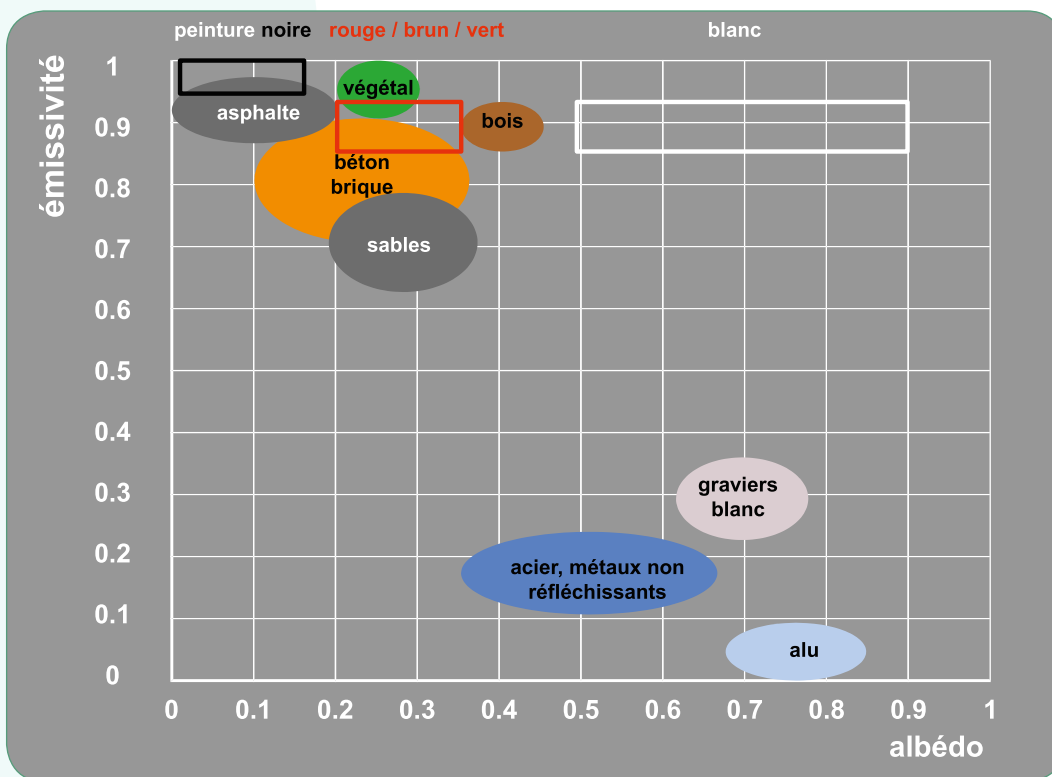
à étudier. Quand le plan masse est relativement libre, un arbitrage fin entre vents et soleil est à définir, à tel point que, dans les années de changement climatique à venir et particulièrement en tertiaire, la position par rapport aux vents devrait jouer le rôle qu'a joué la position par rapport au soleil dans le bioclimatisme des années 70.

> **La nature et la couleur des revêtements proches.** Une partie du rayonnement solaire frappant un revêtement urbain est réfléchi

selon l'albédo du matériau (les forts albédos réfléchissent plus). La partie du rayonnement non réfléchi est absorbée par le revêtement (s'il est opaque) et réémis en infra-rouge, avec un déphasage, selon l'émissivité du

matériau. L'effet d'îlot de chaleur urbain sera réduit par des revêtements d'albédo élevé et d'émissivité faible. Il faut néanmoins penser aux risques d'inconfort lumineux que peuvent créer les surfaces d'albédo élevé.

Albédo et émissivité



Source : TRIBU

> **Les surfaces en eau de la parcelle**, quoique dans une moindre mesure, agissent également sur le micro-îlot de fraîcheur grâce au rafraîchissement induit par l'évaporation. De grandes surfaces en eau, à l'échelle de la ville sont encore plus efficaces et constituent, en outre, une masse de régulation thermique.

Les conseils de l'ICEB

La conception de tampons de fraîcheur sur les abords immédiats du bâtiment, chaque fois que possible, est à privilégier.

4.3 - Réduire les charges internes

Sur cette question, comme sur d'autres, la responsabilité des concepteurs porte sur le fonctionnement, dans des conditions que nous ne maîtrisons pas (comportement réel), de solutions architecturales et techniques construites sur des hypothèses simplifiées (scénarios d'occupation, taux d'utilisation des équipements...). Si on veut sortir de la solution classique et non durable qui consiste à ouvrir largement le parapluie, il faut donc choisir ces hypothèses de la façon la plus rigoureuse possible. D'autant plus que les outils les plus performants, les simulations thermiques dynamiques, y sont très sensibles.

L'usage et sa modélisation en scénarios

Dans la vraie vie, les charges internes relèvent, pour une très large part, de la responsabilité des futurs utilisateurs du bâtiment. Elles sont caractérisées par les horaires, par les modes de travail ou d'habiter, par le marché de l'électroménager ou de la bureautique... Le comportement des utilisateurs est donc un facteur déterminant et il s'agira alors d'attirer l'attention de ceux-ci sur leur intérêt à maîtriser ces charges. C'est la fonction des réunions de sensibilisation lors de la livraison, des livrets d'usages durables et des cahiers des charges preneurs en tertiaire.

Néanmoins, les concepteurs ne sont pas entièrement démunis de moyen d'action.

Densité d'occupation

La densité d'occupation, prédéterminée dès la programmation, est l'un des paramètres dimensionnant des charges internes. En effet, si on évalue à environ 200 W la puissance de charge interne liée à un poste de travail (occupant + bureautique), celle-ci peut peser du simple au triple (de 10 à 30 W/m²) selon la densité d'occupation (de 7 à 20 m²/personne) et donc induire des puissances de rafraîchisse-

ment du simple au double et, parfois, interdire un rafraîchissement naturel.

Normes

De la même façon, les normes d'équipement auxquelles se réfèrent les programmes peuvent peser lourdement sur les charges internes. C'est notamment le cas pour l'éclairage. Les niveaux d'éclairement requis s'élèvent couramment à 400 voire 500 lux sur le plan de travail alors que 300 lux constituent un niveau correct pour lire et écrire sans fatigue. Une uniformité de 80 % sur l'ensemble du local est fréquemment demandée alors que la non uniformité n'est préjudiciable qu'à l'échelle du plan de travail...

Scénarios d'occupation et d'utilisation des équipements

On ne peut utiliser de façon brute, ni les taux d'occupation et d'équipements du programme, ni les scénarios liés aux réglementations diverses (thermique, incendie). Celles-ci sont soit trop conventionnelles, soit conduiraient à des surdimensionnements. Il faut donc travailler de façon plus réaliste, sur la base des scénarios du programme et prendre en compte :

- > que les taux d'occupation varient de façon progressive sur la journée (arrivée, déjeuner, départ, visiteurs), sur la semaine (absentéisme, travail hors bureau) et sur l'année (vacances),
- > que les taux d'équipements varient également, et pas forcément de la même façon que les taux d'occupation,
- > que les programmes sont, en général, établis pour un horizon moyen (quelques années) et que les locaux que nous étudions ont une durée de vie bien plus longue. L'évolution prévisible des équipements est donc à prendre en compte de façon raisonnable.

Les occupants

Les apports internes des occupants sont à la fois sensibles (différence de température) et latents (apports hydriques dans les locaux). Dans le cas de locaux à forte densité d'occupation, les apports totaux des occupants peuvent

devenir un facteur dominant dans le bilan thermique d'une zone.

Les apports internes des occupants sont définis par leur métabolisme thermique, qui dépend grandement du niveau d'activité.

Diverses sources existent pour quantifier ces apports. Le tableau ci-dessous représente les valeurs d'apports sensibles et hydriques par occupant pour divers types d'activités telles que déterminées par le Costic :

Apports sensibles et hydriques

Activité	Apports totaux (W/pers)	Apport sensible (W/pers)								Apport hydrique (g/h/pers)							
		température sèche du local (°C)								température sèche du local (°C)							
		17	19	21	23	25	27	29		17	19	21	23	25	27	29	
Assis au repos	114	93	86	79	73	67	59	45	31	37	46	58	66	80	96		
Assis, travail léger debout	128	102	94	86	78	70	80	46	38	46	60	72	85	101	122		
Assis, travail modéré	145	109	100	90	82	72	81	46	51	61	80	95	110	127	147		
Debout, travail léger	174	119	108	95	84	73	81	48	82	99	121	142	156	175	200		
Travail modéré	197	143	117	103	89	75	83	48	103	116	140	163	182	203	227		
Travail actif	232	142	126	111	96	81	85	51	126	141	170	196	216	237	260		
Travail intense	290	172	153	137	119	104	87	72	192	213	245	274	290	334	337		
Travail pénible	406	208	189	172	153	136	119	100	290	319	357	386	404	428	460		

Source : COSTIC

La part du sensible décroît donc fortement quand la température de l'air augmente et quand l'activité devient plus intense. Il est commun que les apports totaux décrits dans ce type de tableau représentent la réalité pour un adulte homme. Un facteur 0,85 est appliqué pour les femmes et un facteur 0,75 pour les enfants.

Les apports sont ensuite échangés avec l'environnement extérieur sous 3 formes :

- > échange par rayonnement grande longueur d'onde avec les parois,
- > échange par convection avec l'air du local,
- > chaleur latente par vaporisation.

De même que pour le partage entre la part latente et sensible, le partage entre la part

radiante et convective des apports sensibles est à déterminer. Elle est souvent arbitrairement fixée à 50/50 mais les résultats de la recherche tendent à donner 60/40, voire plus, avec une majorité de radiation.

La bureautique

La bureautique représente une part significative des apports internes d'un projet, surtout dans les locaux administratifs et tertiaires en général. La bureautique comprend un certain nombre d'équipements qu'il convient de séparer pour comptabiliser correctement les apports correspondant et définir des actions d'amélioration technologique.

Il est important de noter en premier lieu que les apports internes de la bureautique sont très différents de la valeur de puissance nominale électrique des produits considérés, pour les ordinateurs de 25 à 50 %.

Le tableau ci-dessous communique les résultats d'une étude de terrain menée par O. Sidler pour estimer empiriquement les apports internes de ce type d'équipements. Les résultats ont été mesurés sur plus de 300 ordinateurs, 300 écrans, 300 appareils de bureautique et 3 000 luminaires dans 49 entreprises différentes :

Résultat de relevés de terrain

	Consommation annuelle (kWh/an)	Puissance moyenne en pointe (W)	Puissance à l'arrêt (W)	Puissance en marche (W)
Fixe écran cathodique 21"	521	-	5,6	149
Fixe écran plat 17"	317	-	5,3	81
Fixe écran plat 15"	274	-	4,5	69
Portable 17"	155	-	3,3	59
Portable 15"	112	-	2,5	47
Imprimante laser	267	52		
Imprimante jet d'encre	39	7		
Fax	147	25		
Scanner	95	10		
Traceur	50	14		
Photocopieur/imprimante	681	153		
Distributeur de boisson	3012	317		
Machine à café	1046	177		
Fontaine eau réfrigérée/chaude	487	65		
Fontaine eau réfrigérée	90	8		

Source : Étude Enertech, Jan.2005, relevé consommations

ASHRAE propose un regroupement de tous ces apports selon la densité d'occupation (étude de Wilkins et Hosni (2000), avec des mesures

sur 21 espaces de bureaux dans 5 bâtiments différents).

Estimation des apports internes selon la densité de charge interne

Densité	Légère				Moyenne				Moyenne-lourde				Lourde			
	nb	P(W)	fois.	tot. (W)	nb	P(W)	fois.	tot. (W)	nb	P(W)	fois.	tot. (W)	nb	P(W)	fois.	tot. (W)
Unité centrale	6	55	0,67	220	8	65	0,75	390	10	65	1	650	12	75	1	900
Écran	6	55	0,67	220	8	70	0,75	420	10	70	1	700	12	80	1	960
Imprimante laser	1	130	0,33	43	1	215	0,5	108	1	320	0,5	160	1	320	0,5	160
Fax	1	15	0,67	10	1	15	0,75	11	1	30	0,5	15	1	30	0,5	15
Total				494				929				1525				2035
Charge interne recommandée	5,4 W/m ²				10,8 W/m ²				16,1 W/m ²				21,5 W/m ²			

Source : ASHRAE (Wilkins et Hosni - 2000)

Les valeurs représentatives ci-dessous peuvent être retenues :

- > 65 W pour les apports internes d'un poste fixe (juste la tour, sans l'écran). À cause des ventilateurs de refroidissement, on peut considérer que 90 % de ces apports sont convectifs,
- > entre 15 et 40 W pour les apports internes d'un ordinateur portable selon le processeur et la taille de l'écran. Les apports des portables peuvent être considérés comme 100 % convectifs,
- > entre 20 et 90 W, selon la taille et la résolution, pour les écrans plats aujourd'hui de plus en plus répandus. La plupart de ces écrans pourra être caractérisé par un apport de 30 W. La part convective de ces apports peut être estimée à 60 %.

Pour réduire ces apports, il est intéressant de proposer au maître d'ouvrage une réflexion sur le besoin dans son parc informatique et d'adapter l'équipement aux besoins réels. Un autre point essentiel et très contemporain est la

généralisation des serveurs et des data centers ou encore du cloud computing (délocalisation des stockages et traitements informatiques). De plus en plus, la puissance informatique est délocalisée dans des locaux dédiés.

Il est également utile de savoir aller chercher les produits les plus efficaces qui existent aujourd'hui pour obtenir les puissances de marche les plus basses possibles. On pourra citer ici les produits labellisés Energystar ou encore les produits référencés par l'organisation suisse Topten (www.topten.ch qui recense d'ailleurs les produits à basse consommation d'énergie ou basse émissions de GES sur un large panel de catégories de produits modernes).

Une autre approche consiste à avoir une bonne régulation, autrement dit une bonne gestion de la veille. Des appareils vendus dans le commerce permettent aujourd'hui de programmer efficacement ce type de veille pour pallier aux oublis

des usagers. Comme pour d'autres postes de consommation dans le bâtiment, la régulation recèle un énorme gisement d'économie.

Ainsi, même pour un parc informatique non entièrement renouvelé, il est possible de faire de grandes économies d'énergie par une meilleure gestion de la veille. Faire des campagnes de sensibilisation dans les bureaux est certainement le moyen le plus direct d'y arriver. Il est informatif de se reporter à la démarche Green Office Singapourienne (<http://www.ecooffice.com.sg>) qui pose les bases d'une démarche de sensibilisation et d'amélioration de l'exploitation des bureaux ludiques, couvrant d'ailleurs d'autres aspects comme la gestion du papier, de l'eau, des cartouches...

Enfin, une dernière approche consiste en l'extraction locale des apports internes. Dans les cas particuliers où une source d'apports internes est localisée, il est intéressant d'étudier la possibilité d'installer une extraction locale plutôt que de « gonfler » le système de climatisation pour combattre les apports internes. Concernant la bureautique, cela s'applique surtout dans les salles de serveur ou encore de photocopie à forte densité.

L'éclairage

Les charges liées à l'éclairage artificiel sont sans doute les plus facilement maîtrisables par les concepteurs. En tertiaire, celles-ci peuvent se situer dans une fourchette de 7 à 40 W/m² selon la qualité de la conception. L'accès à l'éclairage naturel est le principal moyen de maîtrise de ces charges à la disposition des concepteurs.

Les apports internes dus à l'éclairage peuvent être très importants pour certains types de bâtiment : supermarchés, salles de spectacle, complexes sportifs, etc. Même pour les bureaux, l'éclairage peut représenter un part non négligeable des apports si des précautions ne sont pas prises. Les apports dus à l'éclairage sont uniquement sensibles.

Le tableau ci-dessous donne des valeurs cibles à rechercher :

Puissance d'éclairage installée y compris ballast (W/m²)

Type de local	Puissance d'éclairage installée y compris ballasts (W/m ²)
Bureau individuel	8
Bureau paysager	7
Salle de réunion, salle commune	9-10
Circulation horizontale	7
Dépôt, archives, sanitaires	5

Source : XPAIR, Jean-Pascal ROCHE

Les moyens pour réduire les puissances installées pour l'éclairage sont détaillés dans le guide BIO-TECH « éclairage ». Nous en résumons ci-dessous les principaux éléments.

Conception et dimensionnement de l'installation

Il s'agit d'abord de s'assurer que la « puissance au plus juste » est suffisante fonctionnellement, en choisissant les bons niveaux d'éclairement, sans excès, avec une uniformité satisfaisante sur les zones à éclairer, en optimisant le partage entre éclairage de fond et éclairage de tâche. Il s'agit ensuite de dimensionner l'installation sans se pénaliser, et notamment de prendre en compte la couleur des locaux intérieurs (un dimensionnement fait avec des coefficients de réflexion plancher/murs/plafond standard donnera des puissances différentes).

Choix des équipements d'éclairage

La puissance électrique installée va dépendre avant tout du type d'éclairage (fluorescent, LED...). Le tableau ci-dessous illustre les

variations d'efficacité lumineuse en fonction du type de source.

Efficacités standards de diverses sources

Nature de la source	Efficacité lumineuse (lm/W)
Lampe halogène TBT	30-40
Lampe fluo compacte	45-75
LED	50-70
Tube fluorescent T8	60-80
Tube fluorescent T5	75-105

Source : XPAIR, Jean-Pascal ROCHE 1/06/2011

Une particularité des apports de l'éclairage réside dans le fait que la part de chaleur qui est réellement transmise à la zone (fraction spatiale) ainsi que la part radiante/convec-tive dépend vraiment du type de montage, de la source de lumière et de la présence ou non d'un petit dispositif de ventilation qui récupère « à la source » la chaleur convective émise par l'éclairage. Le tableau ci-dessous représente des valeurs pour différentes installation d'éclairage :

Part des apports de chaleur pour différents montages et luminaires

	Fraction spatiale	fraction radiative
Luminaire fluo- rescent encastré avec lentille	0,64 à 0,74	0,48 à 0,68
Luminaire fluo- rescent encastré sans lentille	0,4 à 0,5	0,61 à 0,73
Luminaire fluo- rescent compact encastré downlight	0,12 à 0,24	0,95 à 1
Luminaire incan- descent encastré downlight	0,7 à 0,8	0,95 à 1
Luminaire fluo- rescent suspendu	1	0,5 à 0,57

Source : Fisher et Chantrasrisalai (2006)

On voit ainsi qu'il existe un potentiel de gestion des apports internes d'éclairage sur le type de montage dans les locaux. Le potentiel peut atteindre des valeurs importantes (voir tableau ci-dessus). Le choix du luminaire est également très important (forme, focalisation en tâche ou diffusion, matériaux réflecteurs, verre diffuseur...). Le gain en puissance installée peut atteindre 30 %. Enfin, le choix des auxiliaires d'alimentation est important. Le modèle électronique de ballast est moins énergivore que le modèle ferromagnétique. Le ballast électronique peut consommer moins de la moitié par rapport au ballast ferromagnétique.

Choix de gestion d'installation

Bien entendu, un point crucial est également la régulation. La réduction du temps et de l'intensité de l'usage de l'éclairage grâce à l'abondance de l'éclairage naturel est la conséquence normale d'une conception optimisée du bâti.

Le tableau ci-dessous illustre très bien les bénéfices en termes de consommations et donc d'apports internes liés à différentes stratégies de contrôle.

Gain sur les apports selon le système de gestion

Système de gestion	gain
Commande manuelle par interrupteur	0
Commande manuelle par interrupteur + horloge	9 %
Détection de présence + interrupteur de coupure	19 %
Gradation automatique de flux par cellule photoélectrique	29 %
Détection de présence + Gradation automatique de flux	40 %

D'après un calcul sur le moteur RT 2005,
selon XPAir, Jean-Pascal Roche
1^{er} juin 2011

Réglage des installations

Pour le bon fonctionnement de ces stratégies il convient de bien vérifier les paramètres suivants de fonctionnement :

- > la temporisation des détecteurs de présence,
- > le positionnement rationnel des capteurs de présence en évitant les zones de passage fréquents comme les circulations attenantes,
- > les consignes d'éclairement pour les systèmes de gradation en fonction de l'apport en lumière naturelle.

L'implication des futurs usagers est bien entendu nécessaire pour assurer le bon fonctionnement.

Les autres machines

En dehors des équipements mentionnés plus haut, les projets de bâtiments peuvent amener les équipes de maîtrise d'œuvre à quantifier

la contribution thermique de nombreux autres équipements spécifiques d'une activité. Il s'agit alors souvent d'équipements très spécifiques et pouvant apporter des apports internes significatifs comme les équipements de laboratoires et de cuisines.

La stratégie la plus directe alors est de pratiquer la réduction à la source de ces apports par le choix d'équipements aussi efficaces que possibles et par le placement si possible d'une extraction d'air locale pourvu que l'apport considéré soit majoritairement convectif.

Encore plus que pour la bureautique, ces équipements ont des contributions thermiques très dépendantes de leur temps de fonctionnement. Il ne faut absolument pas prendre leur puissance nominale, ni considérer une puissance moyenne avec des temps de fonctionnement erronés. Cela peut fausser considérablement les calculs de confort et de consommation.

Les conseils de l'ICEB

- > En programmation, une juste définition de la densité d'occupation est le premier pas vers la maîtrise des charges internes.
- > En conception, la maîtrise poste par poste des charges internes peut éviter une climatisation.

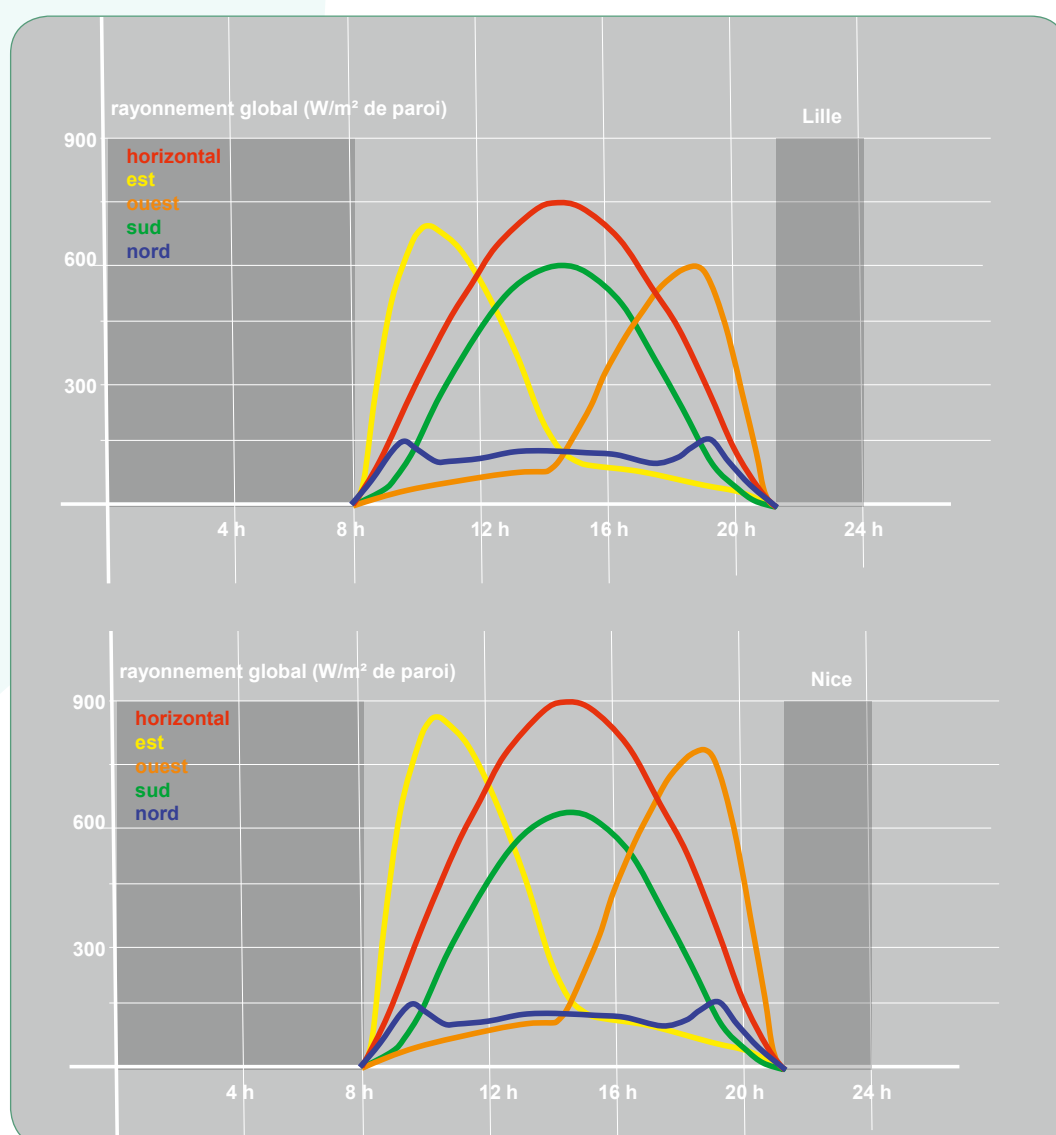
4.4 - Les charges externes

Les sources : soleil, température et humidité

Solarisation

Contrairement à ce qui se passe en saison froide, le soleil est, en été, plutôt haut (de 65 à 70° selon la date et la région).

Rayonnement global (W/m^2 de paroi) pour 2 stations météo sur une journée ensoleillée d'été



Traitement TRIBU sur source Météonorm 1996-2005

L'accès au soleil d'été est le plus important sur les façades est et ouest qui reçoivent un rayonnement solaire, de 600 à 900 W/m², haut en mi-journée et bas d'incidence proche de la perpendiculaire à la façade le matin ou le soir. Au sud le rayonnement est de l'ordre des 600 W/m². Enfin, une façade nord reçoit toujours du soleil en été (de l'ordre de 150 W/m²), et même du soleil direct. Le secteur ensoleillé est beaucoup plus large en été qu'en hiver (de NE à NO par sud au 21 juin et d'E à O les 21 mars et 21 septembre).

Part du rayonnement direct dans le rayonnement global

station	horizontal	nord	sud	est	ouest
Lille	33 %	28 %	26 %	36 %	33 %
Nice	54 %	42 %	38 %	49 %	54 %

Moyenne sur les mois de juin à août – source météo-norm

Le rayonnement provenant directement du soleil (direct) ne représente qu'une part de ce rayonnement global, le reste (diffus) ayant été diffusé sur l'ensemble de la voûte céleste lors de la traversée de l'atmosphère, de nuages ou d'impuretés.

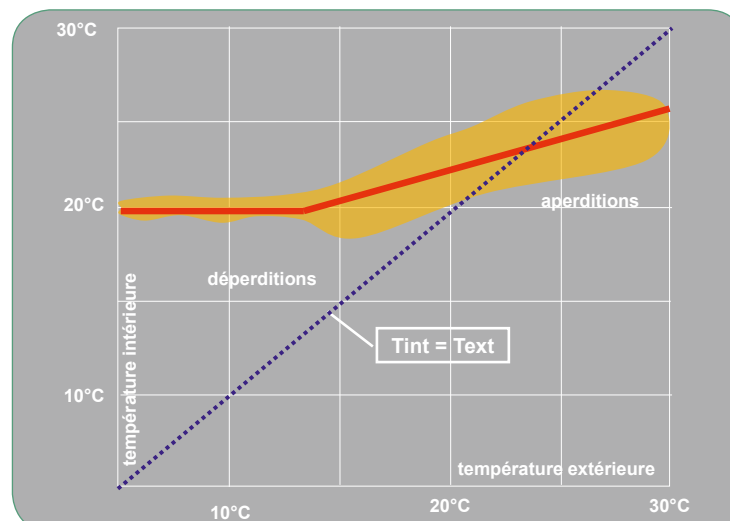
Déperditions et apercutions

L'image des échanges thermiques entre intérieur et extérieur (par transfert d'air ou par

conduction à travers les parois) est fortement marquée par les seules conditions d'hiver, dans lesquelles la température intérieure est toujours supérieure à la température extérieure. On parle de déperdition.

En été, on peut se situer dans cette configuration de déperdition, ou au contraire d'apercution si la température extérieure est supérieure à la température intérieure. En cas de déperditions (mi-saison), l'environnement extérieur (ambiance et air) rafraîchit l'intérieur et, pour en profiter au maximum, il faudrait un bâtiment peu isolé et fortement ventilé. En cas d'apercutions (journée chaude d'été), l'environnement extérieur est source de surchauffe et il est préférable de s'en protéger : forte isolation et renouvellement d'air limité aux débits hygiéniques. La position de la température d'équilibre (entre 26 et 32°C pour des bâtiments courants) dépend des paramètres de conception : apports internes, isolation, renouvellement d'air et inertie. Les apercutions peuvent atteindre une puissance de l'ordre de 5 à 10 W/m²SdP, du même ordre de grandeur que celle des apports solaires avec une protection solaire correcte, ou des apports internes en logement : elles sont donc non négligeables.

Apercutions et déperditions



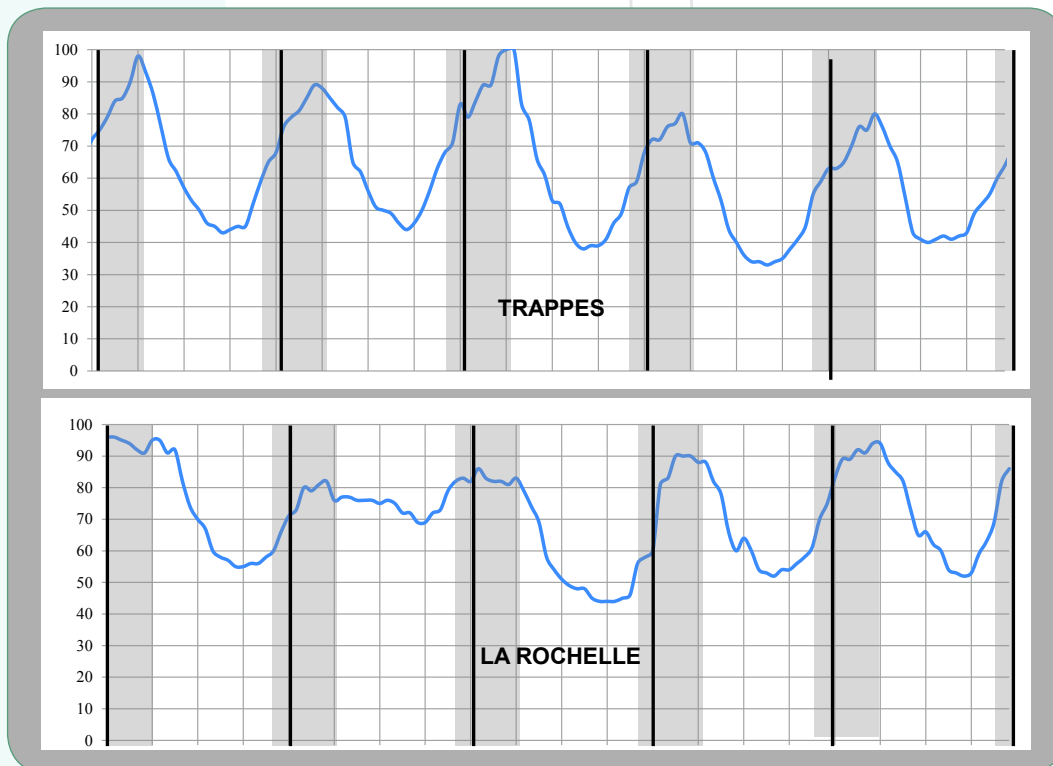
Nuage des points horaires représentatifs et droites de tendance (source : TRIBU)

Humidité de l'air

Sous les latitudes hexagonales, l'hygrométrie de l'air extérieur, en été, peut atteindre des valeurs très élevées durant la nuit (air quasi saturé d'humidité relative supérieure à 90 %). Par contre, en journée, les valeurs d'humidité sont relativement modérées, de 80 % en début de journée à 40 % en fin de journée. ni trop

basses (air sec inférieur à 20 %), ni trop élevées. Par contre, l'hygrométrie de l'air intérieur peut facilement augmenter du fait des occupants dans des typologies de bâtiments à forte densité d'occupation (salles de classe, salles de réunion).

Humidité relative sur 2 stations météo



Humidité relative (%) du 27 au 31 juillet (source : Météonorm)

Parois vitrées, protection solaire et isolation

Les parois vitrées restent, en été comme en hiver, le point faible du confort. Leur moindre isolation laisse pénétrer les apports solaires, mais elles sont surtout plus transparentes au rayonnement solaire, puisqu'elles laissent passer de 60 à 40 % de l'énergie incidente pour une paroi nue à 10 % pour une paroi bien protégée, contre moins de 1 % pour une paroi opaque isolée.

Le facteur solaire S est la propriété des parois qui caractérise leur résistance aux apports solaires. Ceux-ci pénètrent d'abord dans le bâtiment par les vitrages.

Pour un vitrage clair classique, les apports solaires qui traversent le vitrage s'élèvent de 10 à 60 W/m² SdP selon la région, la taille et l'orientation des surfaces vitrées. Un tel niveau est, évidemment, prohibitif. D'où la nécessité de protections solaires, dispositifs extérieurs dont la seule fonction est d'arrêter le rayonnement solaire. Celles-ci améliorent le facteur solaire du vitrage de leur propre facteur solaire S. Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs approchées de facteurs solaires :

Valeurs approchées de quelques facteurs solaires S

	Sud	Nord	E/O
Vitrage clair	0,50 à 0,65		
Casquette étroite été	0,70	0,90	0,80
Casquette large été ou brise soleil fixe	0,35	0,75	0,70
Store intérieur	0,55		
Screen classique extérieur	0,35		
Screen performant ou brise-soleil mobile extérieur	0,20		

Source : TRIBU

La végétation arborée peut assurer une protection solaire d'autant plus intéressante que, en cas d'espèce caduque, elle est présente en été et absente en hiver. Néanmoins, il est préférable de ne la considérer que comme appoint. En effet, son caractère aléatoire (durée de pousse initiale, tempêtes, maladies...) fait qu'elle peut être absente sur de longues durées.

Mais les parois vitrées ne sont pas les seules parois à transmettre des apports solaires. Il en passe aussi par les parois opaques et, notamment, par la plus exposée d'entre elles, la toiture, même si cette voie de transmission n'a pas, en climat tempéré, la même importance qu'en climat tropical. Le facteur solaire d'une toiture peut varier entre 0,001 et 0,01 selon sa couleur et son isolation. Cela justifie, sous certains climats, des dispositifs qui permettent de réduire les apports par la toiture, comme les sur-toitures qui bloquent l'ensoleillement direct ou les toitures végétalisées, qui limitent plutôt les apports grâce à l'évapotranspiration.

Un arbitrage nécessaire

Le choix d'un vitrage et de sa protection est donc une opération délicate qui doit prendre en compte ce critère de confort d'été, mais aussi bien d'autres critères :

- > la porosité à l'air extérieur pour l'accès à la ventilation naturelle, notamment dans les périodes où elle est indispensable (free cooling en mi-saison et surventilation de nuit l'été),
- > la maîtrise des déperditions en hiver, qui induit une forte isolation de la paroi vitrée souvent contradictoire avec la volonté de profiter des déperditions dans les locaux surchauffés en mi-saison. La même préoccupation induit des volets étanches à l'air en position fermée, contradictoire avec leur utilisation en protection solaire poreuse à l'air en été,
- > la récupération des apports solaires en hiver et en logement, évidemment contradictoire avec la nécessité de s'en protéger en été,
- > la transparence à la lumière naturelle dans la plupart des locaux, et notamment dans les locaux de travail, bureaux et scolaires,
- > l'isolation acoustique dans les zones et les périodes bruyantes,
- > la protection contre l'intrusion, la pluie, les oiseaux ou les insectes quand la fenêtre doit rester ouverte derrière la protection en période d'inoccupation. Ce choix se complique par le fait que les performances des vitrages dans tous ces domaines ne sont pas totalement indépendantes. Par exemple, une meilleure isolation d'un vitrage s'accompagne souvent d'une dégradation de sa transparence au rayonnement solaire ou lumineux, d'où l'importance d'une approche bioclimatique transversale (et non pas mono critère, cible par cible) pour faire de ces contraintes des atouts.

Choix multicritères des protections solaires

			Soleil	Lumière	Air
Tertiaire	été	jour	fermé	ouvert	filtre modulable
		nuit			ouvert
	mi-saison	jour	fermé	ouvert	ouvert
		nuit			
	hiver	jour	filtre	ouvert	
		nuit			
Logement	été	jour	fermé	filtre modulable	filtre modulable
		nuit			ouvert
	mi-saison	jour	filtre modulable	filtre modulable	filtre modulable
		nuit			
	hiver	jour	ouvert	ouvert	
		nuit			
Vitrage clair			ouvert	ouvert	fermé
Vitrage à contrôle solaire			filtre non modulable	filtre non modulable	fermé
Casquette			filtre non modulable	filtre non modulable	ouvert
Brise-soleil fixe			filtre non modulable	filtre non modulable	ouvert
Brise-soleil mobile			filtre modulable	filtre modulable	filtre modulable
Store screen			filtre modulable	filtre modulable	fermé

Source : TRIBU

Evaluation sommaire des apports

$$P_{sol} = E_{sol} \times \sum_{\text{parois vitrées}} (I_{vit} \times S_{baie} \times esudeq)$$

avec :

- > P_{sol} est la puissance totale des apports solaires dans le local (en W/m^2 de sol) ;
- > E_{sol} est le rayonnement global (en W/m^2 de surface verticale sud) incident. À défaut de valeurs plus précises, on peut prendre :

Valeurs de E_{sol} (W/m^2)

au sud d'une ligne La Rochelle - Bâle	670
entre les deux lignes ci-dessus et ci-dessous	640
à l'ouest d'une ligne La Rochelle - Lille	570

- > I_{vit} est l'indice de vitrage de la paroi (en m^2/m^2 de sol), la surface de vitrage de chaque paroi divisée par la surface au sol du local ;

- > S_{baie} est le facteur solaire total des baies de chaque paroi, vitrage associé à sa protection solaire en position fermée si elle est mobile ;

- > $esudeq$ est le potentiel sud équivalent lié à l'orientation de la paroi, le coefficient qu'il faudrait appliquer à une paroi sud pour qu'elle ait la même charge solaire que la paroi d'orientation concernée :

Valeurs de $esudeq$

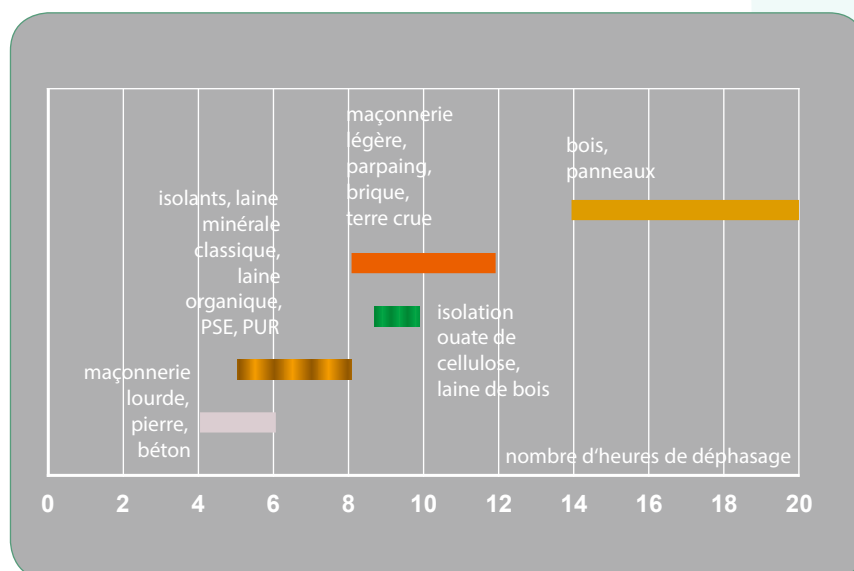
Sud	Est / Ouest	SE / SO
1	1,20	1,10
NE ou NO	N	horizontal
0,70	0,20	1,35

4.5 - Les inerties

L'inertie de déphasage

Pour traverser une paroi, le flux de chaleur met un temps plus ou moins long, en fonction de la nature des matériaux traversés. C'est ce que l'on appelle le déphasage.

Déphasage selon les matériaux



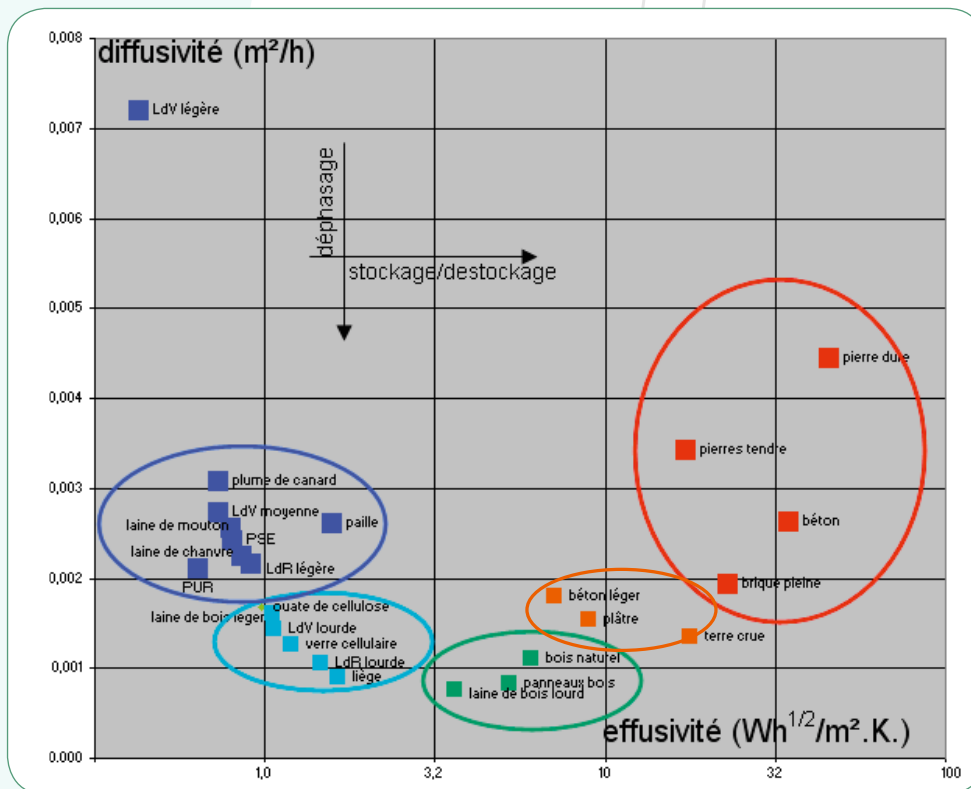
Déphasage pour une épaisseur de 20 cm de matériau. Source : TRIBU

Cette capacité se mesure par la diffusivité du matériau, l'équivalent d'une vitesse de propagation (en surface) de l'onde de chaleur dans le matériau mesurée en m^2/s . L'intérêt du déphasage, en été, dépend de l'usage du bâtiment. Ainsi, en tertiaire, on peut avoir intérêt à reporter le pic de milieu de journée vers la période d'inoccupation. De ce point de vue, en construction classique, les différences sont faibles d'un matériau à l'autre (à l'exception du bois massif) et le déphasage dépend essentiellement de l'épaisseur de la paroi. Sur cette question, la préoccupation d'été peut être contradictoire avec celle d'hiver, comme en logement où on a intérêt à décaler ce même pic vers la nuit alors que ce n'est pas le cas en été.

L'inertie de stockage/déstockage

La capacité de stockage de chaleur par le matériau est caractérisée par l'effusivité du matériau, sa capacité à absorber (ou restituer) une puissance thermique. Plus l'effusivité d'un matériau est grande, plus celui-ci stocke rapidement de grandes quantités de chaleur et moins sa température de surface augmente rapidement. L'effusivité est fortement corrélée à la densité du matériau : plus le matériau est dense (« lourd »), plus l'effusivité est grande.

Choix des matériaux sur les 2 inerties



L'échelle horizontale des effusivités est logarithmique. Source : TRIBU à partir de données diverses

Cette propriété est utilisée en journée d'hiver pour stocker l'énergie du rayonnement solaire (les apports) ayant traversé les vitrages et la restituer de nuit : les surfaces concernées sont principalement le plancher et les parois latérales et de fond. En été, il s'agit d'aller chercher la fraîcheur la nuit, de la stocker et de la restituer en journée. Dans ce processus, les matériaux à forte effusivité sont intéressants car ils permettent de stocker et déstocker rapidement de grandes quantités de chaleur. Seule la couche superficielle de la paroi (de 7 à 10 cm) est intéressée par ce processus mais, par contre, toutes les parois intérieures (planchers, plafonds, murs cloisons, mobilier...) sont concernées et plus la surface d'échange est grande plus le rafraîchissement nocturne est efficace.

Le ratio de paroi lourde est un indicateur qui permet de quantifier cette inertie de stockage/déstockage :

$$RPL = \frac{S_{\text{paroi lourde}}}{S_{\text{enveloppe}}}$$

RPL se calcule sur un local :

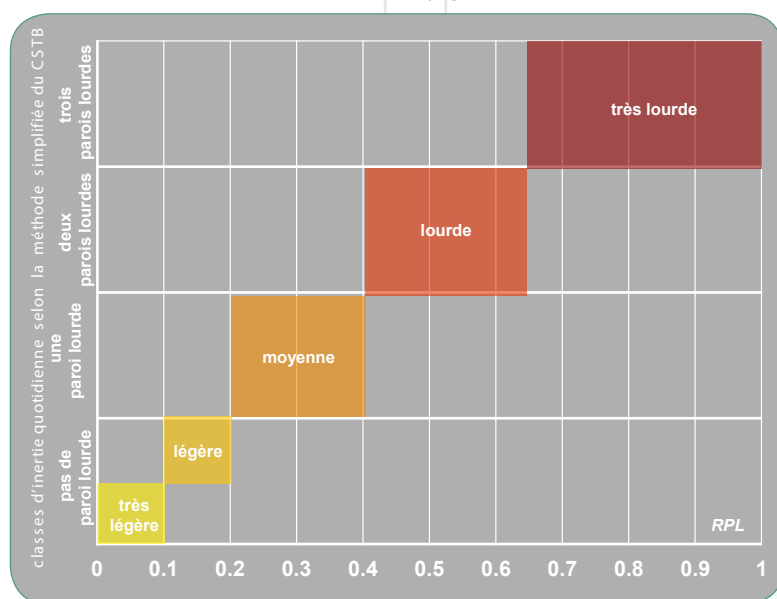
- > S paroi lourde est la surface des parois du local comportant, en contact avec l'air du local, au moins 7 cm de matériau lourd plein ou 10 cm de matériau lourd creux (béton, brique ...).

- > S enveloppe est la surface de toutes les parois, lourdes et légères, opaques ou transparentes, du local.

Cette recherche d'inertie pousse à l'isolation par l'extérieur et à la recherche d'autres

solutions que les faux plafonds pour réaliser l'acoustique ou l'innervation des locaux. Le stockage/déstockage de la fraîcheur nocturne peut se réaliser pour des valeurs de RPL supérieures à 0,5.

Corrélation entre RPL et la méthode simplifiée du CSTB



Source : TRIBU

4.6 - La ventilation

Cette question est traitée de façon plus détaillée dans le guide BIO-TECH « ventilation naturelle et mécanique ». La ventilation de confort d'été se distingue d'abord de l'aération hygiénique par des débits de renouvellement d'air bien plus importants : 5, 10 vol/h voire plus contre 0,5 à 1 vol/h.

La conception d'une stratégie de ventilation naturelle est une des opérations de conception les plus délicates qu'il soit, compte tenu de la complexité des phénomènes en jeu.

Deux phénomènes naturels sont à l'origine des mouvements d'air :

- > le vent qui implique de manière globale les surpressions et dépressions devant et derrière un obstacle,

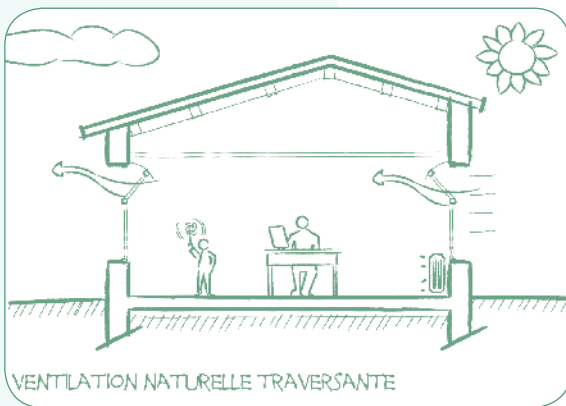
- > l'effet de tirage thermique provoqué par les différences de températures par rapport à une différence de hauteur entre deux points.

Les stratégies de ventilation naturelle

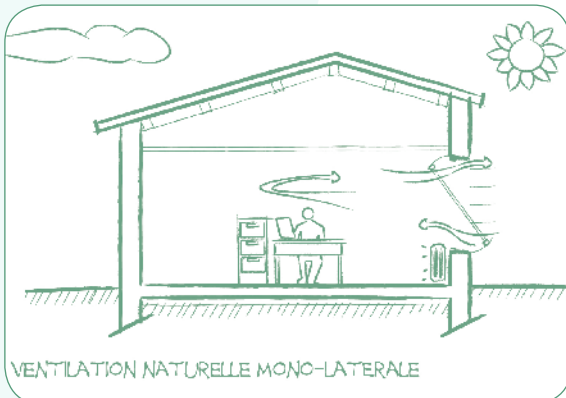
La ventilation naturelle s'effectue grâce aux mouvements d'air à travers un espace sans l'influence d'appareillage mécanique. Les écoulements d'air naturels reposent sur les effets du vent et la variation de la densité de l'air due aux différences de températures.

Nous pouvons identifier trois stratégies de ventilation naturelle classique basées sur les phénomènes cités précédemment :

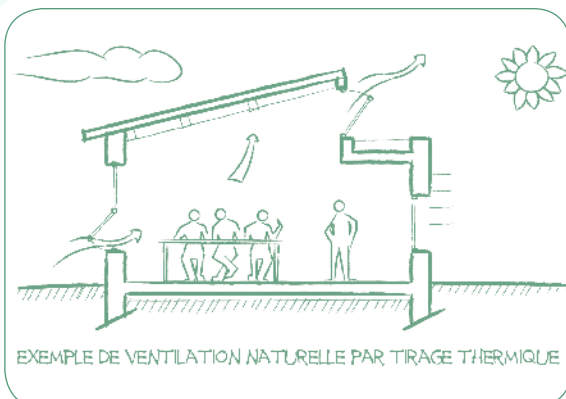
La ventilation naturelle traversante



La ventilation naturelle mono latérale



Les effets de cheminées



Les quelques règles de conception ci-dessous permettront d'optimiser la force motrice :

- > les orifices d'entrée et de sortie doivent être positionnés de façon à assurer le meilleur balayage de l'air possible dans le local,
- > concevoir les ouvertures de sortie de section totale plus grande que celle des ouvertures d'entrée,
- > choisir des ouvertures de surface plus carrées qu'en fentes et éviter les nombreuses petites ouvertures,
- > établir de vastes circulations intérieures et éviter les portes étroites. Privilégier les grandes cages d'escaliers, utiles en particulier pour la ventilation par effet cheminée,
- > choisir des canaux, gaines et cheminées de grande section de forme plutôt carrée ou circulaire,
- > pour obtenir la plus grande hauteur h pour optimiser l'effet thermosiphon, il est possible de prévoir des cheminées pour les bâtiments de faible hauteur,
- > pour obtenir une différence de température élevée entre les deux colonnes d'air alors qu'il est recherché une réduction de la température intérieure justement grâce à la ventilation, prévoir des cheminées (vitrées par exemple) chauffées par le rayonnement solaire,
- > orienter le bâtiment par rapport aux vents de sorte à faciliter l'écoulement d'air de la pression la plus haute vers la plus basse,
- > l'effet du vent sera d'autant plus important que l'on est en hauteur,
- > l'effet de surpression peut être artificiellement augmenté par des obstacles au niveau des ouvertures, grâce à l'effet d'arrêt,
- > les fenêtres pivotantes offrent le potentiel de ventilation le plus élevé,

Les effets de la ventilation naturelle sur le confort d'été

Quelle que soit la stratégie choisie pour assurer la ventilation naturelle, celle-ci peut agir sur le confort d'été de trois façons différentes. Une propriété commune à tous les cas de figures décrits ci-dessous est d'exiger des débits de ventilation importants (pas moins de 5 vol/h et plutôt supérieurs à 10 vol/h) que la ventilation mécanique est incapable d'assurer, dans des conditions de dimensionnement raisonnable. Seul le recours à des ventilations naturelles traversantes, correctement étudiées par rapport aux vents, le permet.

Confort d'été par surventilation directe

Parfois appelé « free cooling », quoi que ce mot ne soit pas réservé aux techniques naturelles, son but est de remplacer, le plus rapidement possible, et le plus complètement possible, l'air du local par de l'air extérieur. Il s'agit alors d'évacuer les surchauffes dues aux apports internes ou simplement de rafraîchir l'ambiance intérieure si l'air extérieur est plus frais que l'air intérieur. Et ce cas de figure est plus fréquent qu'on ne l'imagine, et pas seulement en hiver ou en mi-saison. C'est d'ailleurs la technique courante de ventilation utilisée dans les DOM, en climat tropical, pour rafraîchir naturellement salles de classe, de réunion ou bureaux en période d'occupation, c'est-à-dire pendant la journée. On pourrait donc aussi l'appeler surventilation de jour. Mais elle peut aussi être utilisée la nuit, et pas seulement dans les DOM tropicaux, pour rafraîchir les chambres des logements occupées par des dormeurs.

Confort d'été par surventilation différée

C'est une pratique courante quand il s'agit de rafraîchir un local d'occupation diurne sous un climat tempéré dans lequel la fraîcheur estivale est surtout nocturne. La surventilation naturelle s'effectue alors de nuit et les ouvrants assurant cette ventilation doivent donc être protégés contre l'intrusion, les oiseaux et la pluie.. Puis, il faut un dispositif qui permette de stocker la fraîcheur nocturne et de la rediffuser, dans la journée, avec un décalage d'une douzaine d'heure. On utilise habituellement l'inertie de stockage/déstockage de la structure. Celle-ci doit être suffisamment lourde et répartie sur une surface suffisamment grande dans le local.

Confort d'été par ventilation d'évapotranspiration

Le seul rôle de la ventilation est alors de créer une vitesse d'air sur la peau suffisante pour accélérer le phénomène d'évapo-transpiration. Pour assurer cette fonction par la seule ventilation naturelle, il faut bénéficier de débits importants donc des vitesses de vent très élevées. Habituellement, même avec des vents très forts, on ne dépasse guère des vitesses d'air de 0,5 m/s au voisinage de la fenêtre, ce qui est toutefois suffisant pour améliorer la sensation de confort de 2 ou 3°C. Des vitesses d'air plus importantes peuvent être assurées par des dispositifs mécaniques peu consommateurs tels que les brasseurs d'air (voir plus bas). Au-delà de 1,5 m/s, des inconforts (soulèvement des papiers) peuvent apparaître.

Les conseils de l'ICEB

- > Quelle que soit la stratégie, passive ou climatisation, les apports solaires doivent être limités au strict minimum et un rafraîchissement naturel doit être possible.
- > Le rafraîchissement naturel par free-cooling est préférable à la climatisation dès que l'air extérieur est à une température inférieure à celle de l'air intérieur.
- > Le rafraîchissement naturel par surventilation nocturne exige une inertie au moins moyenne, une porosité (rapport de la surface libre pour l'entrée et la sortie de l'air à la surface à ventiler) d'au moins 6 % et un débit de renouvellement d'air d'au moins 10 vol/h.

4.7 - les solutions techniques à faible consommation d'énergie

Les brasseurs d'air

Exemple de brasseur d'air



Immeuble Mediacom à Saint-Denis © TRIBU

Alors qu'en confort d'hiver, les brasseurs d'air agissent par homogénéisation des températures (destratification), en confort thermique d'été, ils permettent le rafraîchissement des occupants par une augmentation de la vitesse de l'air sur la peau.

Dans certains contextes hygrométriques, une vitesse d'air de 1 m/s peut créer un abaissement de la température ressentie (ou température résultante) allant jusqu'à 4°C.

Les brasseurs d'air peuvent ainsi constituer une alternative à la climatisation de certains locaux. Ils en améliorent le confort thermique et hygrothermique tout en ayant un faible impact environnemental : on peut en effet avoir recours à des moteurs basse consommation, avec des performances énergétiques minimales exigées à différentes vitesses de brassage.

On peut ainsi viser une consommation jusqu'à 4 fois inférieure à celle d'un climatiseur classique (pas de compression mécanique et débits

des ventilateurs moins élevés que pour réaliser un échange thermique entre deux fluides).

Ce type de système, très largement répandu dans les pays du Sud, est donc pratiqué par près de 70 % de la population mondiale. Il apparaît comme une solution performante pour maintenir un confort thermique intérieur de qualité malgré des températures extérieures très élevées.

Le puits canadien ou puits provençal

Le puits canadien ou puits provençal est un système géothermique utilisant la chaleur du sol. Il permet de tempérer l'air entrant dans les bâtiments et, de ce fait, de diminuer les charges de chauffage durant l'hiver et d'apporter un confort d'été convenable. Voir guide « ventilation naturelle et mécanique » page 25.

Le principe est de faire circuler l'air hygiénique du bâtiment dans le sol, via un tuyau enterré, pour l'insuffler ensuite à l'intérieur du local. Il s'agit du système de géothermie le plus simple puisque la circulation de l'air peut se faire naturellement ou à l'aide d'un ventilateur. Il n'y a donc pas ou peu de consommation d'énergie, juste celle due au ventilateur associé.

Le système est basé sur le simple constat que la température de la terre est plus ou moins constante à partir d'une certaine profondeur. A deux mètres environ, elle se maintient autour de 15°C pendant l'été et de 5°C pendant l'hiver. Cette solution convient aussi bien aux logements qu'aux bâtiments tertiaires. Elle est justifiée :

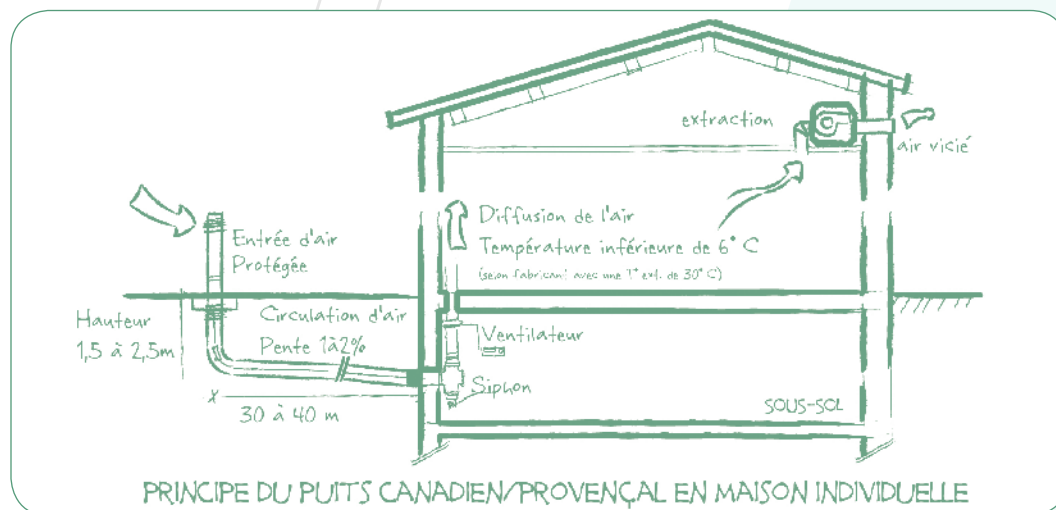
- > En zone sud, pour rafraîchir les locaux et, en ce cas, il faudrait plutôt la qualifier de puits provençal ;
- > En zone de bruit, lorsqu'il faut assurer le confort d'été sans pouvoir ouvrir les fenêtres ou des orifices spécifiques placés en façade.

Cependant le dimensionnement est assez délicat. Il nécessite un logiciel et le suivi des préconisations d'Uniclima est conseillé. De manière générale, il est recommandé :

- > de limiter le diamètre des tuyaux à 30 à 35 cm pour s'assurer d'un bon échange, d'utiliser des tuyaux d'un seul tenant et d'au moins 30 m de long,
- > de les poser sur de la terre d'alluvions ou, à défaut, sur des sablons pour avoir une terre qui les enveloppe bien et qui soit conductrice,
- > de les recouvrir de terre et non d'un bâtiment, de façon à ce que la chaleur solaire vienne bien recharger la terre qui les recouvre,
- > de prendre l'air, si possible, à au moins 1,30 m du sol (recommandation d'Uniclima),
- > de prévoir un dispositif qui permette à d'éventuels condensats d'être évacués dès leur formation.

En maison individuelle, un seul tube peut suffire et des kits assurant une installation sans risques de fuites ou de défauts sanitaires sont proposés. Dans ces derniers, l'entrée d'air du puits canadien possède un système de filtration et est conçue pour éviter d'aspirer de la poussière, des sources de pollution (route, compost...), pour éviter que des animaux (rongeurs, moustiques...) ou les feuilles mortes n'y pénètrent. Les tuyaux sont enterrés à une profondeur de l'ordre de 1,5 m à 2 m en moyenne : cela dépend du « pouvoir calorifique » du terrain, du niveau hors-gel dans le terrain, du diamètre des tuyaux choisis (15 à 20 cm) et de la longueur mise en œuvre de 25 à 50 m. Une solution naturelle est possible, mais un raccordement à une VMC simple ou double flux est plus efficace si l'on vise à la fois le confort d'été et une diminution des consommations de chauffage.

Principe du puits canadien/provençal en maison individuelle



Un puits canadien au lycée Robert Schuman à Charenton



© Sophie Brindel-Beth

Les salles de classes donnent sur une cour fermée qui les protège du bruit de l'autoroute A4 et des voies ferrées. Néanmoins, le niveau de bruit résultant ne permet pas d'assurer les cours fenêtres ouvertes lorsqu'il fait chaud. Un puits canadien de 22 000 m³/h permet d'envoyer dans les classes de l'air rafraîchi : cela a permis d'éviter l'installation d'une production de froid. En période chaude, l'air neuf passe par le puits qui a été installé sous la terre de la cour : il est rafraîchi par échange avec la terre en passant par 52 tuyaux de 35 m de long disposés selon

des lits en quinconce dans la terre. La terre du terrain a été analysée. D'origine alluvionnaire, elle était particulièrement favorable à l'échange. Elle a été remplacée autour des tuyaux lors de la pose de ceux-ci. Les tuyaux sont posés, d'un seul tenant entre deux chambres enterrées. Les tuyaux sont posés sous la cour. Ils sont enfouis dans la terre trouvée sur le terrain, celle-ci étant particulièrement favorable à l'échange.

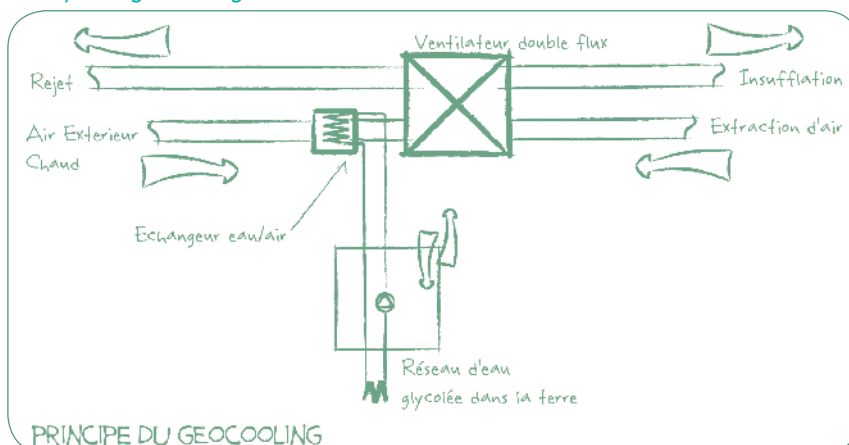
Le géocooling

Le géocooling fait partie des méthodes simples de rafraîchissement passif. Il consiste à utiliser la fraîcheur du sous-sol, grâce à des sondes géothermiques verticales ou grâce à des systèmes horizontaux (exemple du puits canadien hydraulique). En effet, la terre constitue un régulateur de température.

Le géocooling horizontal ou puits canadien hydraulique consiste à faire passer un réseau en circuit fermé contenant de l'eau glycolée (antigel) dans la terre. Ce réseau est uniquement constitué d'une pompe à vitesse variable et d'un échangeur eau-air. La vitesse de la pompe sera en fonction de la température intérieure de la pièce souhaitée. Plus les réseaux seront placés en profondeur, plus le rendement sera élevé. Une isolation du réseau d'eau intérieur est à prévoir pour éviter toute condensation.

Le géocooling vertical consiste à puiser l'eau de nappe souterraine sans passer par la mise en route de la pompe à chaleur géothermique en période de besoin de rafraîchissement.

Principe du géocooling

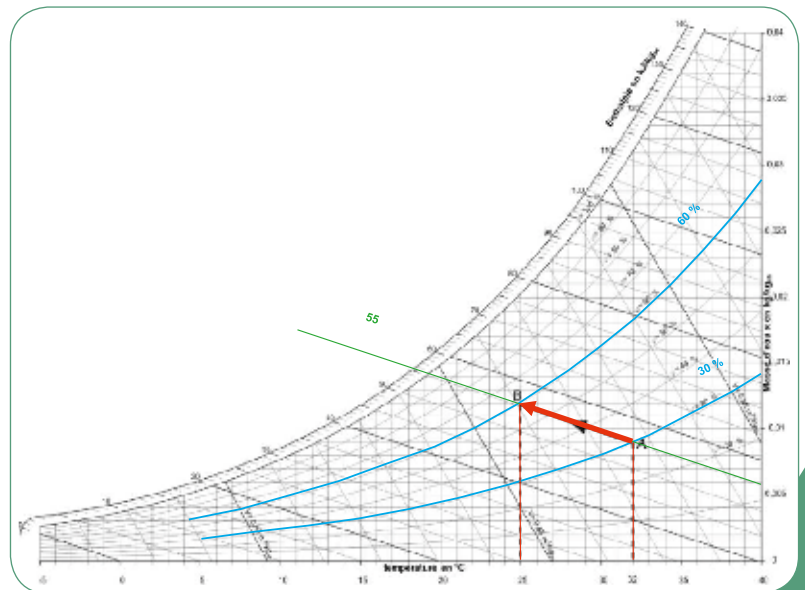


Le refroidissement par humidification ou refroidissement adiabatique

Principe

En été, il faut refroidir l'air entrant. Le refroidissement et l'humidification peuvent être réalisés par pulvérisation d'eau dans l'air. En effet, lorsque de l'eau est pulvérisée, l'énergie nécessaire à l'évaporation de cette eau est retirée de l'air ambiant. S'il n'y a pas d'apport de chaleur, le refroidissement se fait à enthalpie constante, on parlera alors de « refroidissement adiabatique ».

Principe du refroidissement adiabatique sur le diagramme de l'air humide



Il est possible d'abaisser la température de plusieurs degrés : en partant d'une température de 32°C avec 30 % d'humidité relative (point A) et en faisant une humidification jusqu'à 60 % d'humidité relative, on atteint 25°C (point B), ce qui nous fait un refroidissement de 7°C (voir diagramme de l'air humide ci-dessus).

Intérêt environnemental

Les systèmes de refroidissement adiabatique sont très économes en énergie. En effet, ils ne nécessitent qu'une pompe haute pression et des buses afin de pulvériser l'eau en fines gouttelettes de quelques microns. Ils évitent ainsi des refroidissements mécaniques utilisant des gaz réfrigérants peu écologiques et un compresseur énergivore. En contrepartie, le rafraîchissement nécessite la consommation d'eau qui, dans la plupart des cas, est de l'eau potable particulièrement dans le cadre d'un système adiabatique direct. Les limites de ces systèmes sont :

- > la réduction de la température implique l'augmentation de l'humidité relative et donc le risque de sortie de la zone de confort,
- > l'impossibilité de l'utiliser dans des zones à fort taux d'humidité comme les zones tropicales.

Différents systèmes :

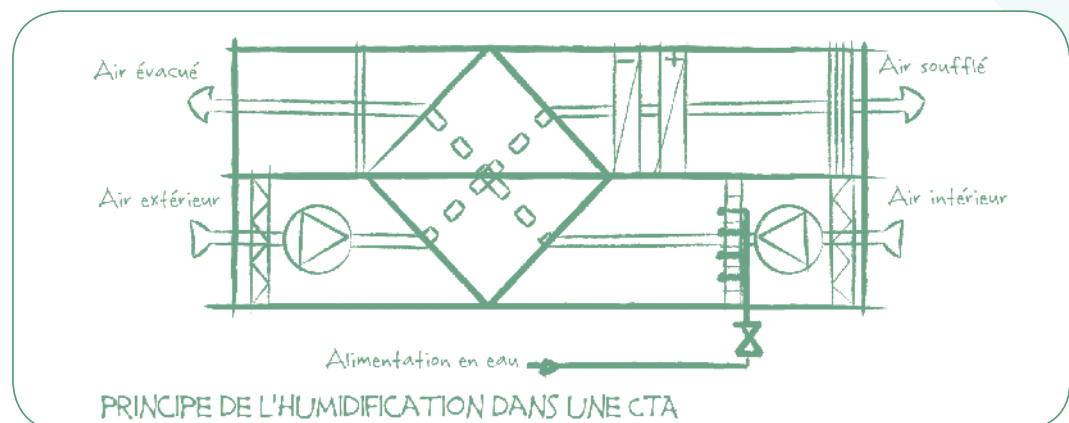
Le refroidissement adiabatique direct.

Le plus connu est sans doute celui que nous rencontrons sur les terrasses de café ou sur les places l'été qui nous rafraîchit ponctuellement. Bien que son rendement soit très mauvais puisque l'air est très vite dispersé il apporte néanmoins un confort ponctuel dans les espaces extérieurs. Mais c'est particulièrement dans l'industrie lorsque les espaces sont importants que ces technologies sont intéressantes car elle permettent une réduction significative de la température. Ces systèmes autorisent un fort taux de renouvellement d'air, n'assèchent pas l'air, ne coutent pas cher et génèrent de très faibles consommations d'énergie.

Le refroidissement adiabatique indirect.

On réalise dans une CTA une humidification massive de l'air extrait, entraînant un refroidissement de l'air soufflé via un échange thermique à travers l'échangeur à plaques ou à roue (voir principe ci-dessous).

Principe de l'humidification dans une centrale au traitement d'air



En plus des avantages du rafraîchissement adiabatique direct, ces solutions assurent une qualité de l'air identique à celle d'une ventilation classique et s'intègrent de plus en plus

dans des centrales classiques de traitement d'air, la consommation du système étant alors celle du système de ventilation classique.

4.8 - Les spécificités de la réhabilitation

Les qualités thermiques du bâti ancien

Le bâti ancien a des qualités thermiques importantes et souvent méconnues. Celles-ci ont évolué au cours des ans. On choisira cependant de distinguer deux grandes étapes (1948 et 1975) entre lesquelles se situe une période charnière.

Jusqu'à 1948 les bâtiments maintiennent avec leur environnement un échange subtil et fragile, hydrique et thermique. Cette période va de la fin de l'architecture haussmannienne (après 1870) jusqu'à l'apparition de nouveaux matériaux de construction manufacturés plus facilement mis en œuvre (planchers en béton armé, structures avec poteaux et poutres, parpaings en terre cuite ou en béton).

Elle se termine avec la période 1948-1975, qui représente un tiers des constructions existantes, et a été une période de reconstruction massive à partir de systèmes de plus en plus industrialisés nécessitant à l'inverse souvent une main-d'œuvre de moins en moins spécialisée.

Les constructions postérieures à 1975 représentent 35 % des bâtiments existants et ont la particularité d'obéir à des réglementations de plus en plus contraignantes, notamment sur le plan thermique. Progressivement, les bâtiments ne réagissent plus avec leur environnement, mais se ferment aux échanges hydriques et thermiques en régulant le confort intérieur de façon autonome. Les modes constructifs ont été également fortement influencés par des contraintes économiques : on est allé « aux états limites ». Ainsi les éléments porteurs ont été de moindre épaisseur, les modes constructifs se sont standardisés, les matériaux de finition et d'habillage ont fait leur apparition au détriment de matériaux traditionnels à forte inertie. Les systèmes constructifs industrialisés (préfabrication) ont raccourci les délais de construction mais apporté des inconvénients acoustiques ou thermiques.

Une étude récente réalisée par la DGUHC, le CETE de l'Est, le Laboratoire des Sciences de l'Habitat de l'ENTPE, les Maisons Paysannes de France a mis en évidence ce comportement thermique spécifique du bâti ancien et les limites des méthodes de calculs actuelles pour évaluer ces bâtiments.

Le comportement thermique d'été est très favorable jusqu'à 1948 date à laquelle l'inertie des parois a chuté conjointement à la multiplication des grandes baies vitrées et à l'augmentation du pourcentage d'ouverture des façades. Les enregistrements de température dans les bâtiments du panel d'étude font état, avant 1948, de performances très intéressantes :

- > des températures intérieures en moyenne inférieures aux températures extérieures,
- > une inertie très forte, de stockage et de déphasage (jusqu'à 8h permettant de restituer la fraîcheur nocturne en journée à l'intérieur des logements).

Les principes d'une réhabilitation durable

Une vision globale

Pour avoir une vision d'ensemble du bâtiment il faut « comprendre » le comportement des matériaux et leurs interactions et ainsi :

- > Proscrire toute solution systématique. Chaque bâtiment ancien constitue un système complexe, aux interactions multiples avec son environnement. Sa réhabilitation doit nécessairement passer par une analyse complète du bâtiment et de ses interactions.
- > Raisonner sur une approche « confort d'hiver plus confort d'été » adapté au climat local. Ainsi, des solutions d'isolation, qui pourraient sembler de prime abord favorables à un thermique d'hiver, pourraient sensiblement réduire les propriétés d'inertie et de respiration du bâtiment, essentielles pour le confort d'été et de mi-saison.

- > Anticiper d'éventuelles pathologies. Chaque solution doit faire l'objet d'une analyse mettant en évidence les conséquences sur les parois d'une nouvelle combinaison de matériaux. Ainsi un mur traditionnel en brique ne pourra être revêtu d'un enduit hydrofuge faute de quoi n'étant plus respirant il produira à plus ou moins court termes des problèmes de condensation dans le logement.

Utiliser les qualités intrinsèques du bâti ancien tout en optimisant les défauts initiaux

Pour aboutir à une réhabilitation durable il faut évidemment conserver et exploiter les qualités initiales du bâti ancien, et notamment celles qui sont favorables au confort d'été :

- > l'inertie et le déphasage,
- > des matériaux « respirants »,
- > les protections solaires extérieures : volets ou contrevents, masques végétaux ou bâtis

peuvent empêcher le rayonnement solaire de pénétrer à l'intérieur du logement,

- > une organisation intérieure traversante : la disposition des pièces permet généralement de créer un balayage de l'air efficace pour rafraîchir naturellement le logement pendant la nuit,
- > l'évaporation : l'eau contenue dans les murs anciens crée du froid en s'évaporant sous les rayons du soleil.

Utiliser des techniques adaptées

Les techniques de réhabilitation sont très différentes des techniques de la construction neuve et nécessitent une grande connaissance du bâti ancien.

Un diagnostic préalable du bâtiment à réhabiliter est donc incontournable. Sur chaque solution adoptée, un arbitrage entre préoccupations d'hiver et préoccupations d'été, adapté au climat et au contexte spécifique du lieu, est à définir. Le tableau ci-dessous constitue une aide à la définition de cet arbitrage.

Ouvrage	Solution	Recherche de l'arbitrage
Baies	Double vitrage	Apports solaires en été comme en hiver : nécessite une protection extérieure.
	Triple vitrage	Apports solaires limités (sauf avec les dernières générations de triple vitrage) : nécessite une protection solaire extérieure.
	Véranda, serre extérieure	L'effet de serre induit peut considérablement dégrader le confort d'été : nécessite une protection solaire extérieure.
	Type de menuiserie	Les menuiseries oscillo-battantes favorisent la ventilation naturelle.
	Position de la menuiserie par rapport au nu du tableau	Une position au nu extérieur est défavorable au confort d'été. Plus le tableau est profond plus il crée un effet de masque.
	Protection intérieure	N'est efficace que pour la modulation de la lumière.
	Protection extérieure	Efficace, d'autant plus que l'écartement avec la menuiserie est important (de l'ordre de 20 cm). A concevoir selon les orientations. Doit laisser passer la ventilation nocturne.
	Occultation extérieure végétale	Leur efficacité dépend de leur croissance, de leur éloignement de la façade et de l'orientation.
Toutes parois opaques	Type d'isolation	Seule l'isolation par l'extérieur limite efficacement les ponts thermiques et garantit un accès à l'inertie (stockage et déphasage). Une isolation rapportée peut engendrer des problèmes de condensation si la migration de l'humidité dans la paroi n'est pas pensée en parallèle.

Ouvrage	Solution	Recherche de l'arbitrage
Murs	Double paroi avec lame d'air	Principe d'isolation efficace en été.
	Mur Trombe	Efficace en hiver avec transfert par air sur les murs isolés. La circulation d'air doit pouvoir être stoppée pendant l'été et une occultation mise en œuvre.
Sols	Double plancher ou chappe rapportée	Solution performante qui nécessite d'avoir un plancher pouvant résister à la surcharge éventuelle.
	Isolation en sous-face	Performante en hiver mais contre-productive en été.
Toits	Surtoiture	Solution très efficace en été qui permet, grâce à une circulation d'air entre toiture et surtoiture, de réduire considérablement l'échauffement de la toiture.
	Isolation sous rampant	Efficace en hiver, peu adaptée en été car ne génère pas de ventilation qui permette une régulation de la température de la toiture. Le type d'isolant et la pose doivent permettre l'évacuation d'une éventuelle condensation.
	Isolation sur plancher	Performant en hiver mais ne permet pas de profiter du tampon thermique du comble.
Ventilation	Brasseur d'air	Peut s'utiliser en complément d'une ventilation naturelle (été). Permet en outre de réduire la stratification (hiver).
	VMC	En garantissant un renouvellement d'air continu et en abaissant les taux d'humidité et de polluants dans l'air, ce dispositif est aussi efficace en été qu'en hiver. En augmentant le débit d'air durant la nuit, il est possible d'augmenter l'efficacité du dispositif en été.
	Ouvrants	La réouverture de baies fixes permet d'améliorer la ventilation naturelle et le rafraîchissement en été.
	Cloisonnement	Un recloisonnement favorisant les circulations d'air traversant améliore la ventilation et le rafraîchissement naturels en été.
	Surventilation nocturne	La ventilation naturelle permet ainsi de répondre, sans dispositifs techniques aux surchauffes estivales.
Apports internes	Densité	La densification de l'occupation et des équipements n'est pas favorable au confort d'été.

Source : Albert & Compagnie



5. Les méthodes et outils de calculs

À chaque application son outil. Chaque type d'outil est adapté à une fonction donnée et à une phase donnée du projet. Pour faire une optimisation du degré d'inertie en confort d'été à partir de l'APS, à une phase où la description du bâtiment est suffisamment détaillée, la simulation thermique dynamique (STD) est particulièrement adaptée. Il en est de même pour calculer le nombre d'heure d'inconfort à la même étape. Mais pour définir une stratégie de confort d'été en début d'esquisse ou prévoir, en cours d'esquisse, si les solutions passives seront suffisantes, alors les méthodes simplifiées, les règles sur le pouce, sont bien mieux adaptées, et au résultat recherché, et à la description plus sommaire, du projet.

5.1 - Les simulations thermiques dynamiques

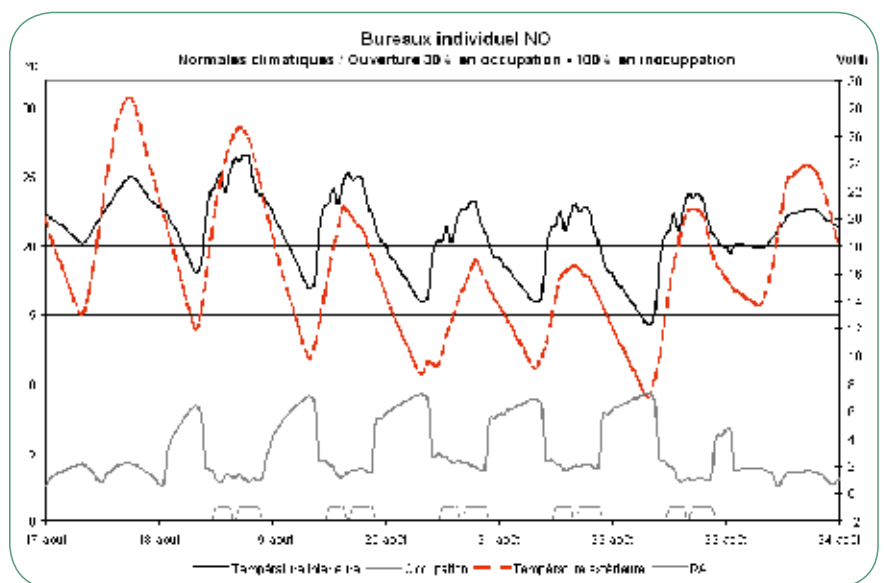
Les STD peuvent exprimer les résultats de ces calculs en terme de confort de plusieurs façons différentes, par exemple sous forme de profils de températures, ou de diagramme de Givoni.

Exemple de sortie de STD

Un puissant outil de conception

Les simulations thermiques dynamiques (STD) sont des outils spécialement dédiés à la conception. Elles permettent de dimensionner les dispositifs passifs permettant d'assurer le confort d'été et d'effectuer de l'optimisation par comparaison de solutions techniques. En matière de confort d'été, ces outils permettent de définir :

- > les niveaux d'isolation,
- > la taille, la position et la nature des surfaces vitrées et de leurs protections solaires,
- > le positionnement et les niveaux d'inertie,
- > les orifices, les dispositifs et les débits de ventilation naturelle,
- > les logiques de fonctionnement de tous ces dispositifs.



Profil de température. Source : TRIBU

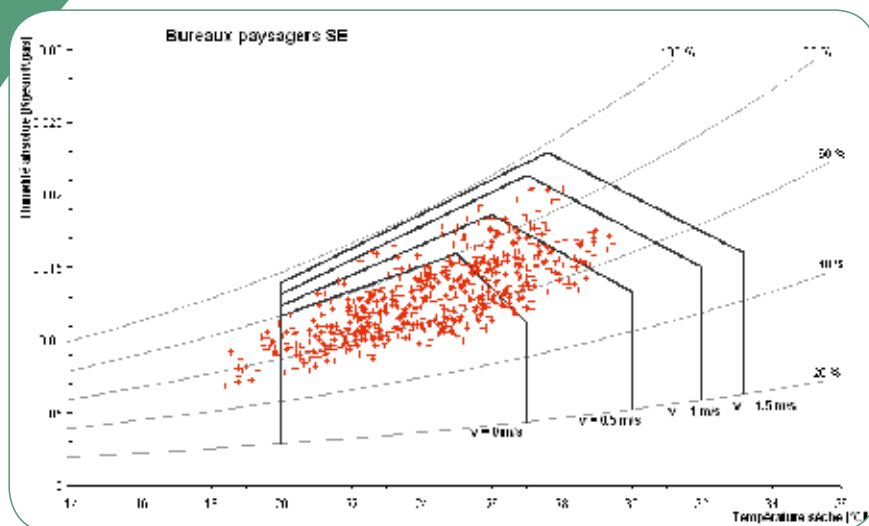


Diagramme de Givoni. Source : TRIBU

Un rapport de STD doit comporter, outre les résultats, un descriptif détaillé des hypothèses choisies : données climatiques, scénarios d'occupation et de fonctionnement du bâtiment, caractéristiques thermiques et aérauliques du bâtiment ...

Quelques faiblesses

Les différents outils habituellement utilisés par les BET (Pleiades-Comfie, TRN SYS, Design Builder – Energy +, Virtual Environment, TAS ...) ne donnent pas tous les mêmes types de résultats et ne travaillent pas tous au même niveau de saisie.

Il convient tout d'abord de remarquer que les STD ne sont que des outils de calcul qui sortent un résultat entièrement déterminé par les hypothèses saisies, et que, en plus, elles possèdent une très grande sensibilité à ces hypothèses. Certaines de ces hypothèses ne sont que des chiffres à rentrer, d'autres exigent une modélisation de tel ou tel détail de fonctionnement du bâtiment que l'outil ne sait pas traiter tout seul. La moindre erreur d'interprétation ou de saisie sera aveuglement répercutée. Il est donc nécessaire d'effectuer des tests de vérification basés notamment sur la cohérence des sorties et sur le réalisme des ordres de grandeur. Avant d'être un calculateur, il faut être un thermicien.

La description du bâtiment

Sur certains outils, la saisie des ponts thermiques par description linéaire n'est pas possible. Le plus rigoureux est alors d'augmenter le coefficient U surfacique d'un ratio permettant de prendre en compte les ponts.

Sur d'autres, c'est la saisie des fuites dues à la perméabilité à l'air qui n'est pas précise. A défaut d'un calcul plus précis, on pourra prendre, en ventilation naturelle, la valeur suivante :

$$n_{fuite} = 0,15 \times (n50 - 0,5)$$

Cette valeur, qui correspond à une zone traversante en site venté, peut-être :

- > fortement réduite (divisée par 3) en site très peu venté,
- > réduite d'environ 30 % pour les zones non traversantes,
- > augmenté d'environ 30 % pour des bâtiments au-dessus de R+8.

Enfin, le calcul des masques solaires (bâtiments proches ou dispositifs de façade) n'est pas toujours aisé. Il doit néanmoins être traité avec grand soin car il agit au premier ordre sur les conditions de confort d'été.

Les débits de renouvellement d'air

Certains logiciels de STD ne disposent pas d'un calcul aéraulique permettant de définir les débits d'air en fonction des vents et des orifices disponibles. On doit alors rentrer « à la main » une valeur de débit d'air. Celle-ci n'est pas automatique et doit être pré-calculée. Le choix d'un scénario de vent extérieur permettra d'affecter, sur les directions principales des vents, une vitesse à une fréquence. Un calcul simplifié, exposé plus bas, permet de définir la vitesse de vent efficace sur la façade et les débits de renouvellement d'air selon que le local est traversant ou non. Ensuite, un calcul de STD pour chaque direction principale de vent permettra de définir les conditions de confort qui seront affectées de la fréquence correspondante.

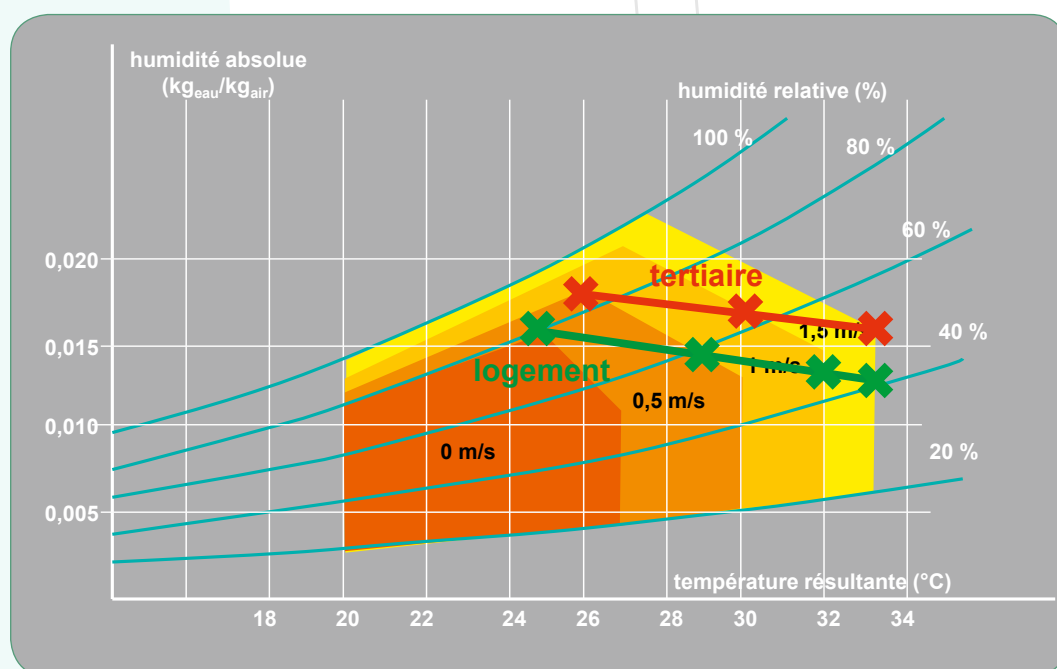
L'humidité de l'air

Certains logiciels de STD ne calculent pas d'humidité d'air. Une application simplifiée (mais défavorable) des zones de confort de Givoni peut être faite en se basant sur une configuration courante de corrélation entre humidité relative et température opérative.

Températures résultantes de confort limite en fonction des vitesses de l'air

Vitesse de l'air	0 m/s	0,5 m/s	1 m/s	1,5 m/s
Résidentiel	25°C	29°C	32°C	33°C
Tertiaire	-	26°C	29°C	33°C

Prise en compte simplifiée de l'humidité relative



Exemple en tertiaire : le nuage des points représentatif des couples température opérative / HR en été se situe, pour sa plus grande partie, en dessous de la droite rouge dite « tertiaire ». Cette droite coupe le périmètre de chacune des zones de Givoni en un point qui sera considéré comme la température résultante de confort pour cette zone. Source : TRIBU

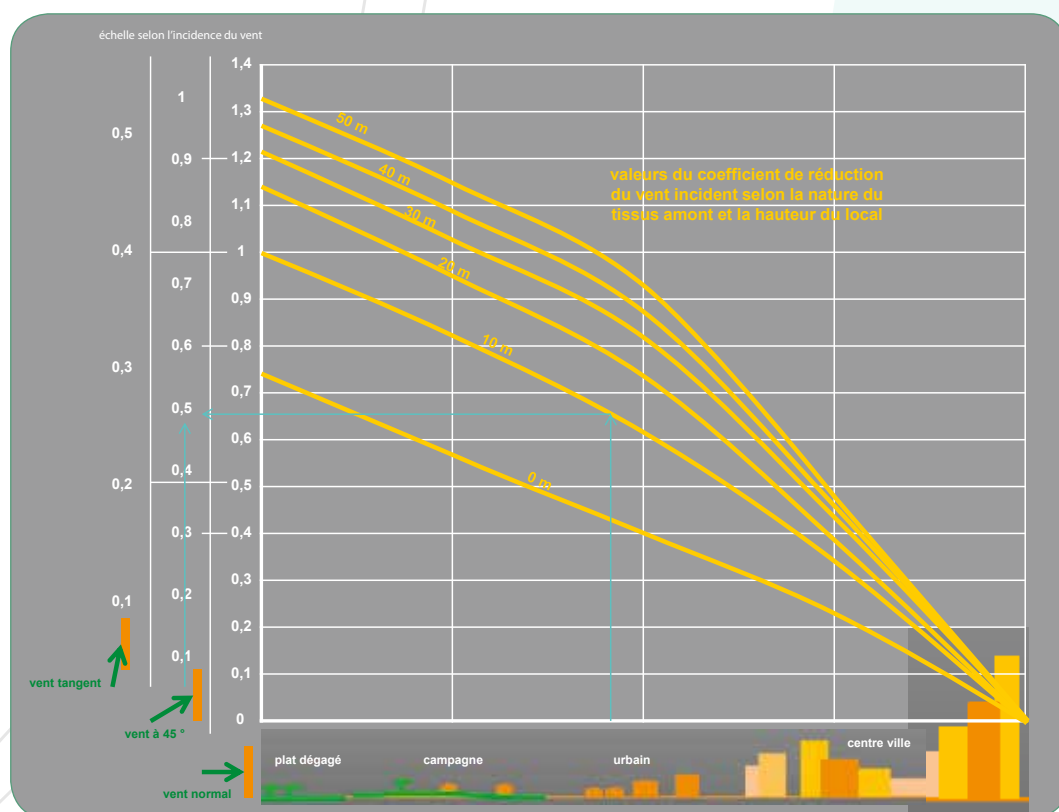
5.2 - Les méthodes simplifiées, sur le pouce

Les calculs de vent amont

Les données météo fournissent la vitesse et la direction du vent à la station météo. Cette vitesse est corrigée par la nature du tissu en amont du bâtiment, la hauteur du local étudié

dans le bâtiment et l'incidence du vent sur la façade. L'abaque ci-dessous permet un calcul simplifié du coefficient de réduction du vent incident.

$$V_{\text{effectif}} = C_{\text{réduction}} \times V_{\text{météo}}$$



Exemple de mode d'emploi : 1 – définir la nature du tissu en amont du vent (urbain) 2 – repérer le point du faisceau des courbes jaunes correspondant à ce tissu et à la hauteur du local étudié (10m) 3 – lire sur l'échelle correspondant à l'incidence du vent (45°) la valeur du coefficient de réduction de vent (0,5) (Source TRIBU, d'après Jacques Gandemer)

On considérera comme non ventée une façade située à une distance d'un masque inférieure à 10 fois la hauteur de ce masque.

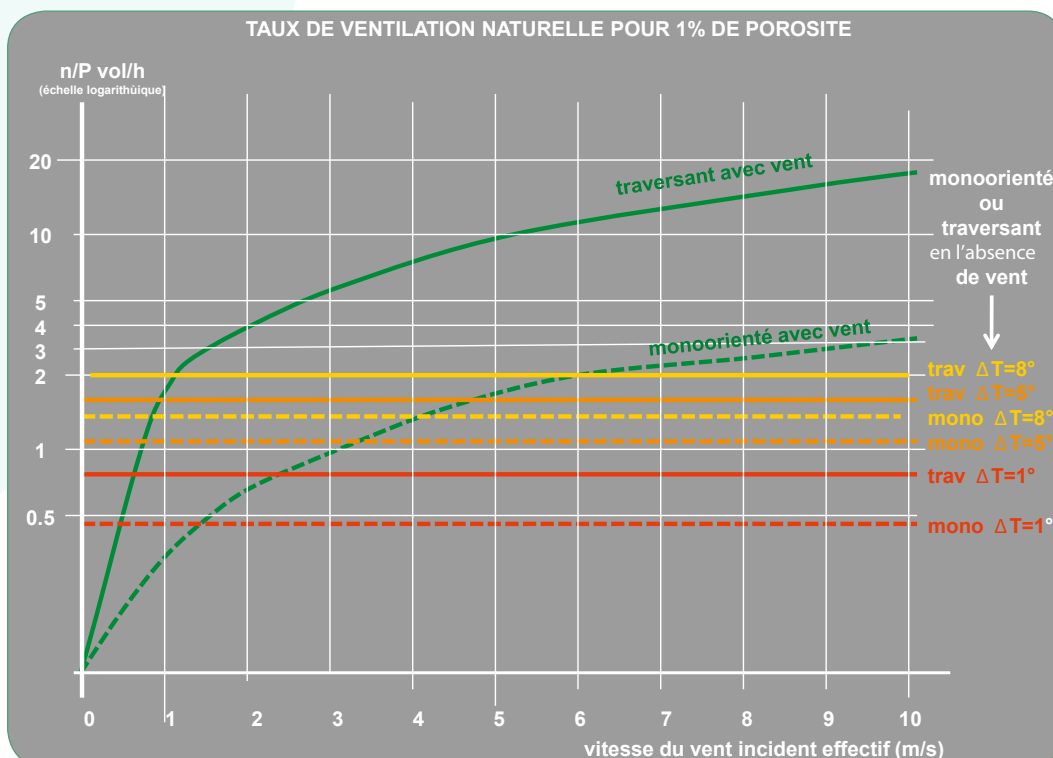
Les calculs de débit

Les British Standards donnent des règles sur le pouce pour le calcul des débits de ventilation qui sont synthétisées dans le diagramme ci-dessous. Il permet de prédéterminer une valeur approchée de l'indicateur n/P , rapport du taux de renouvellement d'air (exprimé en vol/h) à la porosité du local⁶ (exprimée en %), selon les critères ci-dessous :

- > en mono orienté ou en traversant,
- > avec vent en fonction de la vitesse du vent (m/s),
- > sans vent en fonction de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.

On choisit la courbe correspondant au type de logement (traversant ou mono-orienté) et au mode de ventilation choisi. En cas de vent, seul compte l'effet du vent. En l'absence de vent, il reste le tirage thermique (sur une hauteur classique de fenêtre). on lit sur la courbe choisie le débit n/P (échelle logarithmique) correspondant à la vitesse du vent. Il ne reste plus qu'à multiplier par la porosité P (%) pour obtenir le débit de renouvellement n (vol/h). Par exemple un vent de 3 m/s dans un local traversant de porosité 6 % donne un taux de $5,5 \times 6$ soit 33 vol/h.

Calcul simplifié du taux de renouvellement d'air en ventilation naturelle



Source : TRIBU d'après British Standards

6 - la porosité P est le rapport de la surface libre pour l'entrée et la sortie d'air du local, ramenée à la surface au sol du local

Un débit de renouvellement d'air de 10 Vol/h permet d'assurer une surventilation suffisante pour le confort d'été. Il est obtenu pour une porosité de 6 %, même avec des vents faibles,

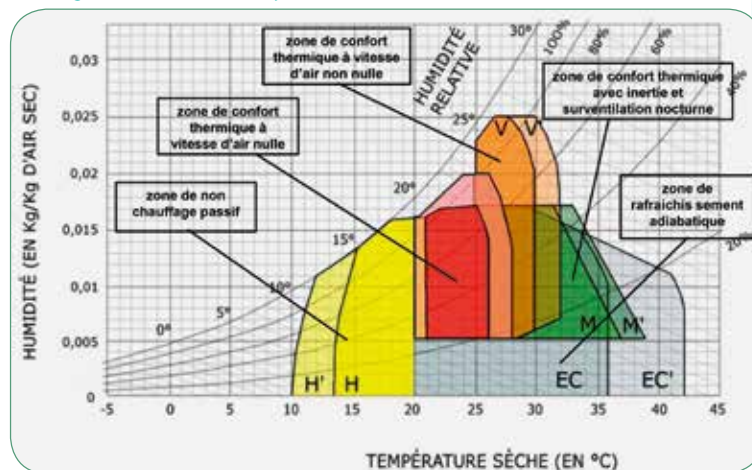
et sans tirage thermique (donc avec des différences de température jour-nuit très faibles), en local traversant.

Le diagramme bioclimatique ABC (Architecture, Bioclimatique et Construction)

Le laboratoire ABC de l'École d'Architecture de Marseille (Jean-Louis Izard) a adapté au contexte hexagonal une méthode largement

utilisée en Amérique latine et consistant à définir, sur le diagramme de Givoni, des zones de confort selon les dispositifs mis en œuvre.

Le diagramme bioclimatique

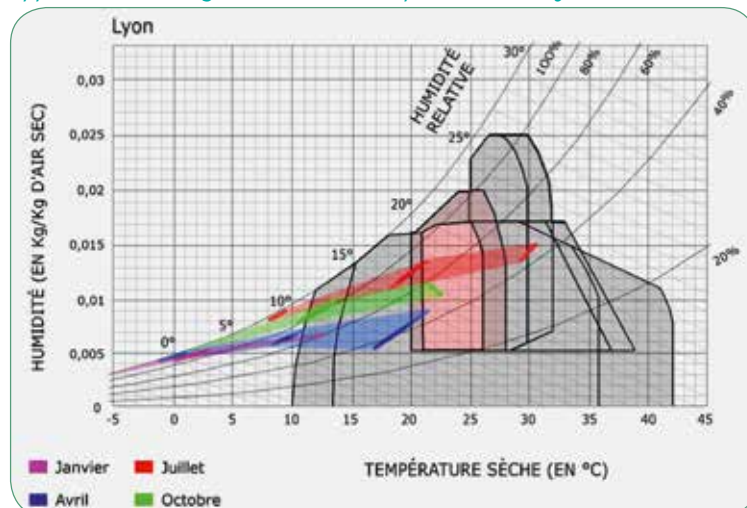


Source : ABC

Il suffit alors de positionner sur ce diagramme des plages saisonnières température/humidité relative du site pour repérer quelles solutions techniques permettent d'atteindre le confort sur l'exemple

ci-dessous : en mi-saison, une approche passive suffira environ 50 % du temps. En été, le confort sera assuré avec l'accroissement de la vitesse d'air, sans forcément faire appel à l'inertie.

Application du diagramme bioclimatique au climat lyonnais



Source : ABC

Givoni simplifié

La méthode s'applique à un local. Si celui-ci n'était soumis à aucun apport ni interne ni externe, ses conditions d'ambiance (température et humidité) dériveraient lentement vers celles de l'extérieur : on considère ce point sur le diagramme de Givoni comme conditions initiales.

On rajoute ensuite les variations de température et d'humidité induits par les apports internes et externes, ainsi que par les stratégies de ventilation. Le point obtenu sur le diagramme de Givoni à l'issue de ce cheminement représente les conditions de confort dans ce local.

Données pour Givoni simplifié

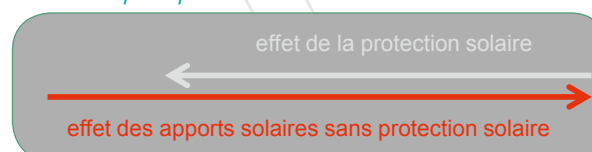
			Logement	Bureau	Scolaire
Apports internes	(°C)	Inertie légère	5	8	7
		Inertie moyenne et lourde	3	5	5
	(kg eau / kg air sec)		0,002	0,005	0,005
Apports solaires sans protection solaire (°C)	S/E/O	Inertie légère	25	17	10
		Inertie moyenne et lourde	15	10	7
	N	Inertie légère	5	3	2
		Inertie moyenne et lourde	3	2	1,5
Surventilation nocturne (°C)	Ventilation Hygiénique	Inertie légère	0	0	0
		Inertie moyenne et lourde	-3	-3	-1
	Ventilation forte	Inertie légère	0	0	0
		Inertie moyenne et lourde	-8	-8	-5

Source : TRIBU

Les apports solaires du tableau ci-dessus sont réduits de l'efficacité (1 – facteur solaire) des protections solaires choisies, selon la figure ci-contre.

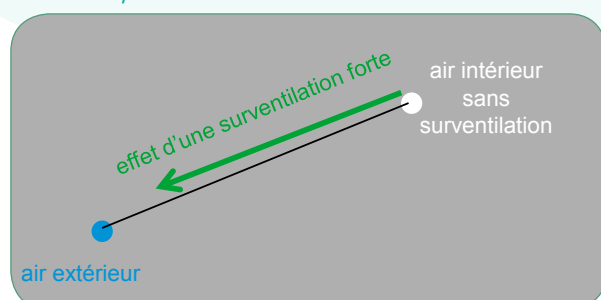
Une surventilation en occupation réduit la distance entre l'air extérieur et l'extrémité du cheminement de 20 % pour des débits faibles (de l'ordre de 2 vol/h) ou 80 % pour des débits forts (de l'ordre de 20 vol/h).

Correction pour protection solaire



Source : TRIBU

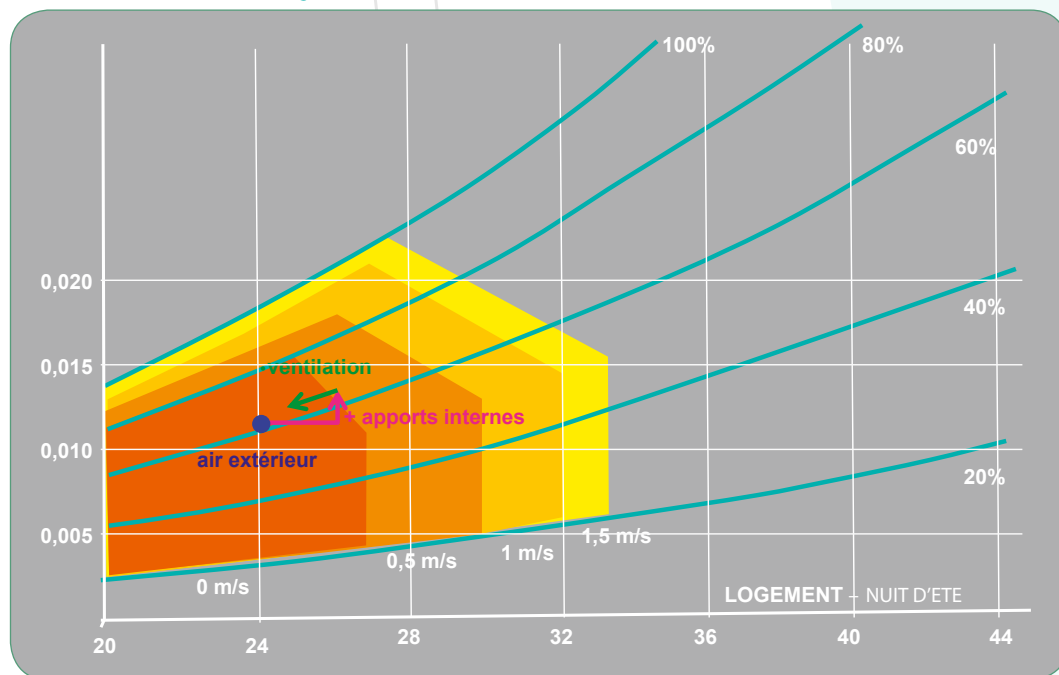
Correction pour surventilation



Source : TRIBU

Les exemples ci-dessous illustrent la méthode

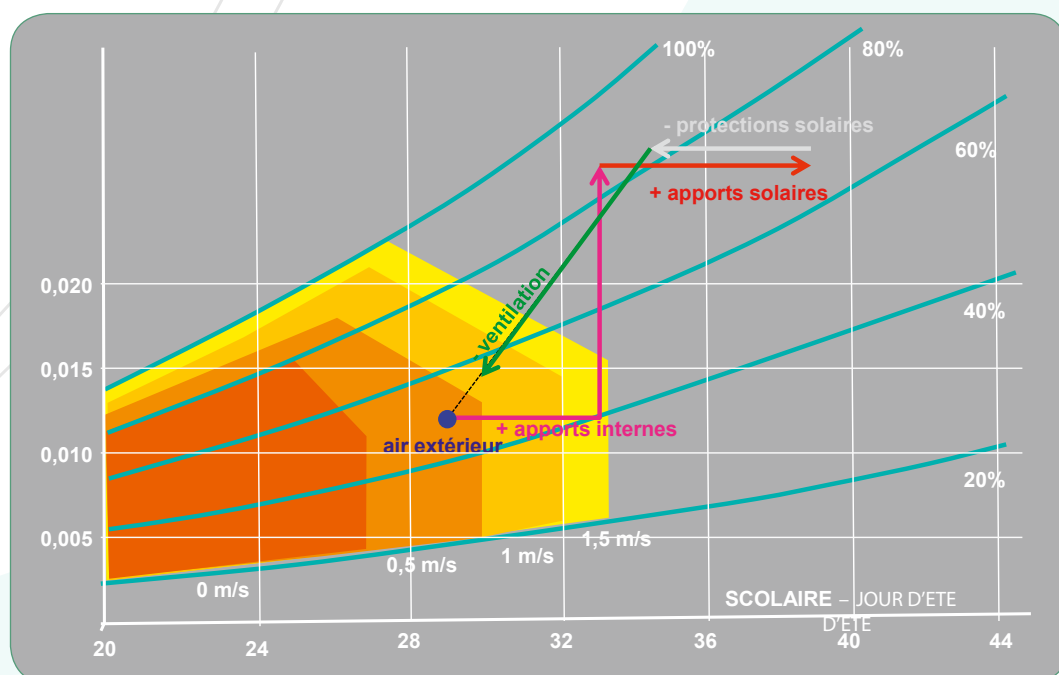
Surventilation de nuit en logement



Stratégie classique pour les nuits d'été en logement, en l'absence d'apports solaires et avec des apports internes relativement faibles, une

forte surventilation directe permet d'obtenir une température proche de celle de l'extérieur.

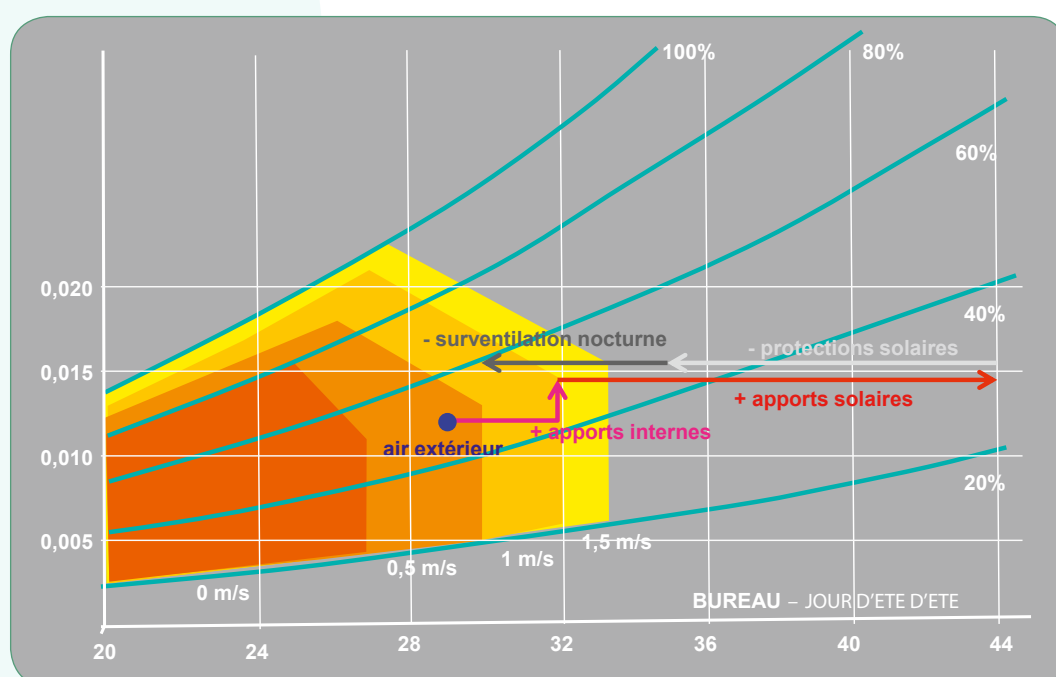
Surventilation de jour en salle de classe



Stratégie classique en climat tropical pour les locaux à fort apport interne et en occupation de jour. Une bonne protection solaire est indispensable et une forte ventilation de jour permet de se rapprocher de la température

extérieure. Quand celle-ci est trop élevée, ce dispositif doit être complété par des brasseurs d'air. Encore peu utilisée en climat tempéré, cette stratégie devrait s'imposer dans un contexte de changement climatique.

Surventilation nocturne différée en bureau



Stratégie de surventilation nocturne classique en climat tempéré, elle complète les protections solaires. Mais, sur l'exemple ci-dessus on

doit néanmoins avoir recours à des brasseurs d'air à 1 m/s.



6. Exemples

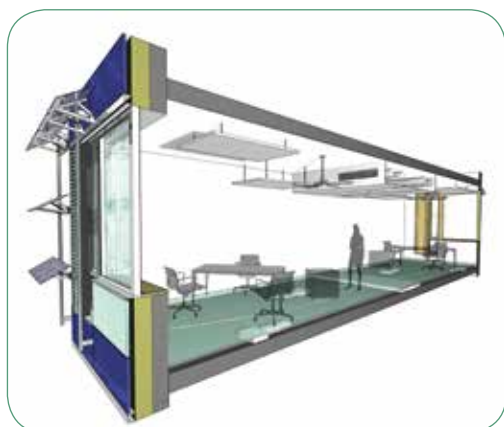
Immeuble de bureaux « green office » à énergie positive meudon (92)

Maîtrise d'ouvrage: Bouygues Immobilier \ AMO
DD : Tribu \ Maîtrise d'œuvre : Ateliers 115 archi-
tectes, Optime BET.

Les 20 000 m² de bureaux non climatisés, à énergie positive, de l'immeuble Green Office combinent, pour le confort d'été, surventilation nocturne et brasseurs d'air.

La surventilation nocturne est dimensionnée pour une configuration de bureaux cloisonnés, donc mono-orientée. Elle utilise un caisson de ventilation naturelle spécifique dont le volet automatisé, d'ouverture réduite en journée d'été pour la ventilation hygiénique naturelle, s'ouvre complètement les nuits chaudes. Ce caisson est protégé de l'intrusion, de la pluie et des oiseaux par une grille extérieure. L'ouverture manuelle des fenêtres permet, par ailleurs, de réaliser une ventilation de confort au gré de l'utilisateur.

Coupe sur un bureau type



Source : Bouygues Immobilier

La forte inertie nécessaire pour le processus de stockage-déstockage a conduit à supprimer les faux plafonds pour laisser l'accès libre à toute la surface béton du plafond. L'acoustique est alors assurée par un élément réduit suspendu (qui comprend également le luminaire et la surface radiante pour le chauffage). L'innervation des réseaux est réalisée par un caniveau central.

Le dispositif est complété par des brasseurs d'air, sur une trame correspondant à un poste de travail.

Nombre d'heures de dépassement des conditions de confort (calcul prévisionnel)

Météo	Normales climatiques	Canicule	
Condition de confort sur température opérative Top	Top>28°C	Top>28°C	Top extérieure à la zone de confort avec vitesse d'air 1m/s
Bureau individuel	0 h	30 à 60 h	4 h
Bureau paysager	0 h	0 à 30 h	3 h



Les « boîtes à ventilation naturelle » en façade d'un bureau paysager
© Tribu

IUP DE SAINT-PIERRE (RÉUNION)

Maîtrise d'ouvrage : Université de la Réunion \ AMO DD : Tribu \ Maîtrise d'œuvre : Faessel Bohe architecte, INSET BET.

Premier bâtiment non climatisé et premier bâtiment à énergie positive à la Réunion, L'IUP de Saint Pierre bénéficie des meilleures techniques passives en climat tropical.

Les brise-soleil, optimisés par héliodon, protègent aussi bien les façades opaques que les surfaces vitrées. Elles complètent les fortes avancées de toit, efficaces contre la grande hauteur angulaire du soleil tropical. La forte végétalisation des abords et du patio intérieur crée un îlot de fraîcheur non négligeable.

Les toitures de couleur claire, l'isolation des murs et des toitures, leur masse thermique qui crée un décalage d'une quinzaine d'heures du pic de chaleur journalier ... créent une température de paroi intérieure plus faible que la température d'air et contribuent au confort.

La forte ventilation traversante des locaux, à des débits qui se mesurent en centaines

de volumes/heure, évacuent complètement les surchauffes dues à l'occupation interne des bureaux et salles de classe. Néanmoins, cette forte ventilation est insuffisante pour créer les vitesses d'air de l'ordre de 1 m/s facilitant l'évapotranspiration. Ces vitesses d'air sont donc créées par des brasseurs d'air plafonniers.

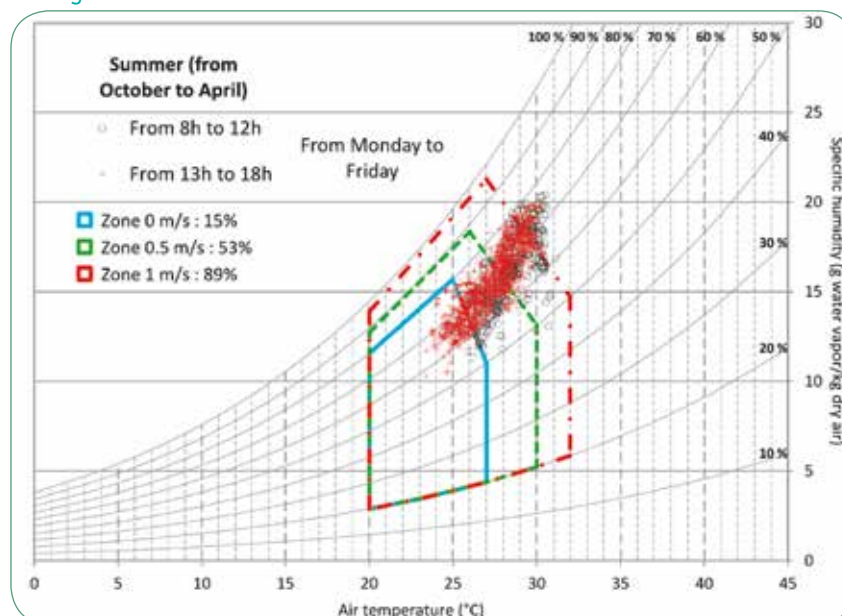


Un bureau de chercheurs
© TRIBU



Îlot de fraîcheur dans un des patios © Aurélie Lenoir

Le diagramme de Givoni sur une salle de classes



Source : Laboratoire PIMENT de l'Université de la Réunion

ILET DU CENTRE À SAINT-PIERRE (RÉUNION)

Maîtrise d'ouvrage : SCCV Saint Michel \ Maîtrise d'œuvre A2PMR (Michel Reynaud et Antoine Perreau) + APA, architectes, GECP, OMEGA, AFI, LEU Réunion BET.

Sur cette opération de 66 logements et 312 m² de bureaux livrés en 2008, ni les logements ni les bureaux ne sont climatisés.

Le cœur de parcelle est entièrement « jardiné », les stationnements étant positionnés sous les bâtiments, l'opération propose ainsi un véritable poumon vert lié à l'histoire des jardins urbains de La Réunion.

Les bureaux et logements, distribués par cour-sive, sont traversants entre une façade sur rue, exposée aux vents mais protégée par un tampon végétal, et une façade arrière sur jardin. L'organisation des bâtiments sur le site prend en compte les vents dominants et les brises.

Cette organisation bioclimatique de l'espace extérieur et intérieur est complétée par diverses dispositions :

- > toutes les baies sont des baies ouvrantes, de sorte que la porosité des locaux correspond

aux recommandations PERENE⁷, en tenant compte des vents dominants d'alizés,

- > les baies, et les parois, sont protégées du soleil,
- > les toitures, qui représentent 80 % des apports thermiques sont fortement protégées,
- > les inerties thermiques sont « en intérieur » et non exposés aux ensoleillements directs,
- > les bâtiments sont réalisés sur pilotis pour permettre la ventilation sous les masses bâties.

Un des dispositifs les plus efficaces est le tampon végétal, espace d'environ 3 m de profondeur, créé entre la rue et la façade, largement protégé du soleil et fortement végétalisé. Des mesures de température effectuées, sur des journées en saison chaude, entre la rue et la façade interne des bâtiments montrent une différence de température moyenne de 4°C avec des pointes à 6 ou 7°C.



Ilet - Centre © Leu



Ilet - Coignet, La Réunion © Bornarel

7 - PERENE, référentiel énergétique réunionnais.

MAISON DE QUARTIER « AUX SÉNARDES » À TROYES

Maîtrise d'ouvrage : Ville de Troyes \ Maîtrise d'œuvre Colomes et Nomdedeu Architectes \ BE DD Les ENR

La Maison de quartier « Aux Sénardes » est un bâtiment à énergie positive (BEPOS) livré en 2012 à la ville de Troyes dont la conception a commencé en 2008.



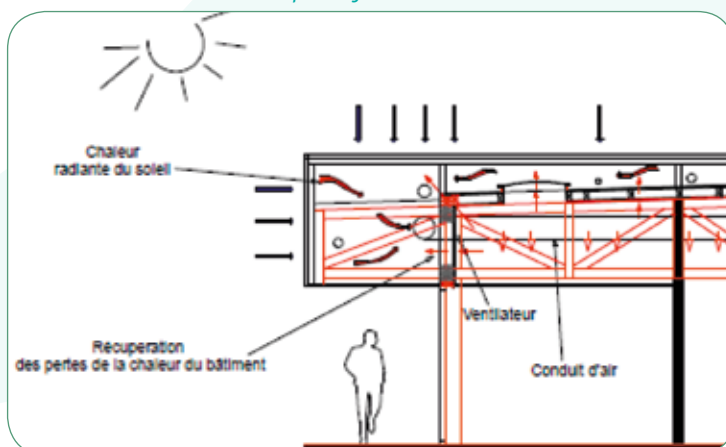
Maison de quartier « Aux Sénardes » © Agence Colomes Nomdedeu

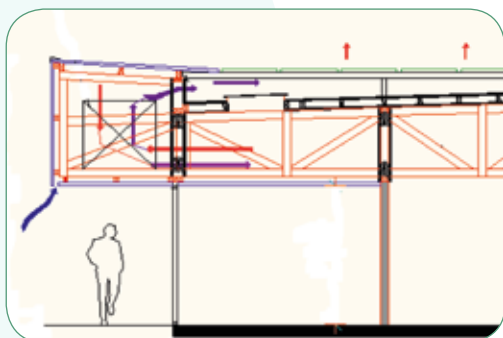
Le bâtiment dispose d'une double toiture permettant d'améliorer le confort d'été et de réduire les consommations liées à la ventilation en hiver. Une première toiture étanche enveloppe la coque du bâtiment puis une seconde enveloppe protège physiquement le bâtiment et supporte les panneaux photovoltaïques.

Cet espace compris entre les deux toitures permet de préchauffer l'air en hiver en entrée de la ventilation double flux, à l'inverse, l'été, les apports solaires sont limités sur la toiture

principale, cet espace intermédiaire étant alors ventilé naturellement.

Principe de fonctionnement de la toiture en hiver



Principe de fonctionnement de la toiture en été

© Les ENR

L'été, sous l'effet des rayons du soleil, la zone entre les deux toitures s'échauffe mais, sa ventilation naturelle elle-même accélérée par ce réchauffement, permet son rafraîchissement. Cette protection permet donc d'éviter le rayonnement direct du soleil sur la toiture et de favoriser les échanges thermiques avec l'air extérieur au travers de prises d'air sur la partie basse de la façade.

Cette double peau est en plus conçue pour empêcher les apports solaires directs sur les baies vitrées de la façade Sud - Est en été du fait de son débord. La façade Nord-ouest pour laquelle les ouvertures sont limitées est-elle protégée par une végétalisation existante mais aussi réaménagée dans le cadre du projet.



Façade Nord-Ouest © Colomes Nomdedeu

7. Bibliographie

7.1 Les fondamentaux

- > FANGER, P. O., « Thermal Comfort » (Mc Graw Hill Book Company, New York) 1973.
- > GIVONI Baruch, « L'homme, le climat et l'Architecture », (Editions du Moniteur, Paris, 1978).

7.2 L'architecture

- > LIEBARD Alain & DE HERDE André (2005) « Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique. Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable » (Editions le Moniteur).

7.3 Les normes

- > ISO 7730, « Ambiances Thermiques Modérées – Détermination des Indices PMV et PPD et Spécifications des Conditions de Confort Thermique », (AFNOR, Paris, 1994).
- > ASHRAE, « ASHRAE Handbook of Fundamentals », (SI Edition, pp. 8.1-8.29, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2005).
- > ANSI/ASHRAE Standard 55, « Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy », Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air conditioning Engineers, Inc, 2010).

7.4 Pour en savoir plus sur le confort thermique d'été

- > BRAGER G.S. et DE DEAR R.J. « Thermal comfort in naturally ventilated buildings : revisions ASHRAE Standard 55 ». (Energy and buildings 2002). BRAGER G.S. DE DEAR R.J. et COOPER, D. « Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference ». (ASHRAE 1997).

- > Garde F., David M., Adelard L., Ottenwelter E., « Elaboration of Thermal Standards for French Tropical Islands: Presentation of The PERENE Project », (Clima 2005, octobre 2005). GIVONI Baruch, « Passive and low energy cooling of buildings » ; (John Wiley and sons, New York, 1994).

- > GIVONI Baruch. « Climate considerations in building and urban design » (New York, Van Nostrand Reinhold Publishers Ltd., 1998).

- > GIVONI Baruch. « Comfort, climate analysis and building design guidelines ». (Energy and building), 1992.

- > Humphreys M.A. et Nicol, J.F. « Understanding the adaptive approach to thermal comfort ». (ASHRAE Transactions 104, 1998).

- > Humphreys M.A. et Nicol, J.F., « The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments », (Energy and Buildings 2002).

- > IZARD J.L., KACALA O., « Les données thermo-hygrométriques méditerranéennes » (EnviroBAT-Méditerranée 2006).

- > Lavoye, F. Thellier « Le confort thermique dans le bâtiment », (IEPF Novembre 2008).

- > Parsons K.C. « Human Thermal Environments. The effects of hot, moderate and cold Environments on Human Health, comfort and performance. The principles and the Practice ». (Taylor and Francis 1993).

- > Thellier Françoise « Thèse de doctorat. Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat ». Université de Toulouse, UPS 1989).

> VOGT J.-J., & Miller-Chagas P « confort thermo-hygrométrique, définition physiologique et détermination pratique de zones de confort thermique » (Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics - 1970).

7.5 Et sur l'approche psychosociologiques du confort thermique d'été

> Cerqueira, J. J., Mailliet, F., Almeida, O. F. X., Jay, T. M., & Sousa, N. « The prefrontal cortex as a key target of the maladaptive response to stress » (The Journal of Neuroscience, 2007).

> Evans, J. S. "Thinking Twice: Two minds in one brain" (New York: Oxford University Press 2010).

> Gheorghiu, V. A., Polczyk, R. et Kappeller, C. « The Warmth Suggestibility Scale – a procedure for measuring the influence of suggestion on warmth sensations » (Personality and Individual Differences, - 2003).

> Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B. et al. « Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training » (Journal of Cognitive Neuroscience - 2000).

> Huteau, M. « Manuel de psychologie différentielle ». (Paris: Dunod - 1995).

> Jonville E. & Fradin J. « Bien utiliser son cerveau pour vivre sans stress » (Cerveau & Psycho no 34 (2009)

> Kantola S. J., Syme G. J. et Campbell N. A. « Cognitive dissonance and energy conservation ». (Journal of Applied Psychology - 1984).

> Pallack, M. S., Cummings, W. « Commitment and voluntary energy conservation » (Personality and Social Psychology Bulletin, 1976).

> Ridderinkhof, K. R., Nieuwenhuis, S., & Brauer, T. S. "Medial frontal cortex function: an introduction and overview. Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience" (2007).

> Ridderinkhof, K. R., Ullsperger, M., Crone, E. A., & Nieuwenhuis, S. "The role of the medial frontal cortex in cognitive control. Science, (2004)"

7.6 L'îlot de chaleur urbain

> Ait-Ameur, K. « Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains : Validation d'un système d'indicateurs morpho-climatiques et d'un indicateur de confort » (Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes - 2002).

> Akbari, H., Pomerantz, M., et Taha, H. « Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas » Solar Energy - 2001).

> Anquetil, V. « Evolution des formes de végétation dans la ville durable : approche historique et perspectives ». (Technical report, Plante et Cité, Angers. - 2011).

> Dimoudi, A. et Nikolopoulou, M. « Vegetation in the urban environment : microclimatic analysis and benefits » (Energy and buildings, - 2003).

> Doulos, L.; Santamouris, M. & Livada, I. « Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials » (Solar Energy, 2004).

> Escourrou G., « Le climat et la ville ». (Presses universitaires Nathan, Paris 1991).

> Guyot, G. « Climatologie de l'environnement : de la plante aux écosystèmes ». Masson 1997).

> Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., and Mihalakakou, G. « Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance » (Energy and building, - 2001).

> OKE, T. « Boundary layer climates », (Routledge - 1987).

> OKE T.R. « Overview of interactions between settlements and their environments » (WMO experts meeting on Urban and Building climatology, WMO, Genève. 1982).

7.7 Le vent

> DAVENPORT A.G. « an approach to human comfort criteria for environmental wind conditions » (Teaching the teachers, Stockholm - 1972).

> GANDEMER J. « la ventilation naturelle en pratique » (ADEME 2011).

> GANDEMER J. et GUYOT A. « intégration du phénomène vent dans la conception du bâti » (CSTB 1976).

> WISE A.F.E., SEXTON D. et LILLYWHITE M.S., « air flow around buildings » (urban planning symposium, Londres - 1965).

8. Les 10 réflexes qui peuvent éviter la climatisation

- > Planter les abords du bâtiment d'herbe, de buissons et d'arbres sur une bande d'au moins 3 m.
- > Orienter les ouvertures du bâtiment de sorte qu'elles bénéficient des vents d'été.
- > Prévoir des fenêtres largement ouvrantes et munies de protections solaires extérieures et poreuses à l'air sur toutes les orientations ensoleillées.
- > Ne pas prévoir d'activité prolongée à plus de 6 m d'une façade ouvrante.
- > Privilégier les locaux traversant ou, au moins, bénéficiant de deux orientations différentes.
- > Favoriser les principes constructifs et architecturaux qui apportent le maximum d'inertie intérieure, même en construction sèche.
- > Assurer un éclairage naturel suffisant pour réduire au minimum l'éclairage artificiel en journée.
- > Choisir les équipements et appareils qui émettent le moins de chaleur possible.
- > Ne pas craindre les courants d'air en été.
- > Adapter son habillement et son comportement aux conditions climatiques estivales.

ARENE Île-de-France

Expert et référent de la Région francilienne pour le développement durable, l'Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies (ARENE) accompagne les collectivités locales et les acteurs régionaux dans leurs démarches. En associant expertises, réseaux et outils, elle fait le lien entre l'analyse et la mise en œuvre de solutions concrètes.

ICEB

L'Institut pour la conception écoresponsable du bâti (ICEB), est une association regroupant aujourd'hui une soixantaine de professionnels de l'architecture, du bâtiment, de l'urbanisme, de la santé et de l'environnement qui, au quotidien, déploient sur le terrain leur expertise de la construction et de l'aménagement durables et responsables, au service de l'usager et de son environnement.



- Ventilation naturelle et mécanique •
- L'énergie grise des matériaux et des ouvrages •
- L'éclairage naturel •
- Confort d'été passif •



39, boulevard Beaumarchais - 75003 PARIS
Tél. : 01 77 45 36 50 - Fax : 01 40 29 43 85
www.asso-iceb.org



94 bis, avenue de Suffren - 75015 Paris
Tél. : 01 82 52 88 00 - Fax : 01 40 65 90 41
www.arenidf.org