

SOHF Société suisse de santé au travail en établissements de soins

Comment réussir un bâtiment malsain?

Claude-Alain Roulet
Ingénieur Physicien EPUL; Prof. honoraire EPFL
claude.roulet@epfl.ch

Houses are built to live in and not to look on.
Les maisons sont faites pour y vivre, pas pour les regarder
Francis Bacon, Essays

RÉSUMÉ

L'exposé, malgré son titre provocant, montre tout de même comment réussir et exploiter un bâtiment où il fait bon vivre ! Les progrès de la physique du bâtiment pendant ces 50 dernières années permettent actuellement de concevoir et de construire – voire rénover - des locaux confortables et à faible impact environnemental.

Après une définition du concept de bâtiment malsain et du syndrome associé, quelques résultats d'audits de bâtiment administratifs, tant en Suisse qu'en Europe sont présentés, qui montrent plusieurs tendances permettant d'étayer les conseils prodigués par la suite. En fait, le concepteur et l'exploitant doivent privilégier les mesures passives pour assurer un bon environnement intérieur, en les complétant au besoin par des mesures actives. De plus, ils doivent toujours garder les besoins de l'occupant parmi leurs nombreuses préoccupations. Pour cela, ils peuvent soit se baser sur une grande expérience soit, si on désire innover, mettre à profit les nombreux outils de modélisation disponibles pour prédire les effets de diverses options sur la qualité de l'environnement intérieur. Quelques exemples illustrent cette stratégie.

MALADIES CAUSÉES PAR CERTAINS BÂTIMENTS

Lorsque les normes de conception ou de construction ne sont pas respectées, certaines affections peuvent en résulter. Citons notamment:

- Les conséquences d'émissions excessives de composés organiques volatils, par exemple de solvants toxiques, de formaldéhyde émis par certains matériaux ou de benzène provenant du garage
- La concertation excessive de radon, cause de cancer du poumon (voir l'intervention de Vincent Perret et Joelle Goyette)
- Les effets de l'inhalation passive ou active de fumée
- Les intoxications au monoxyde de carbone résultat d'installation de combustion hors normes ou mal utilisées (brasero par exemple)
- La présence simultanée de personnes allergiques et d'allergènes (acariens, moisissures)
- Les expositions à des agents pathogènes hors normes professionnelles
- etc.

Les symptômes correspondant à l'exposition exagérée à chaque contaminant sont connus, les causes de ces maladies généralement aussi, ce qui fait que l'on a progressivement fortement réduit les expositions aux contaminants toxiques: on évite l'immission du radon dans les bâtiments, on respecte les normes d'installation des calorifères, les garages ne sont pas en liaison directe avec les logements, les matériaux de construction ne contiennent pratiquement plus de COVs toxiques, l'isolation moderne a pratiquement supprimé la prolifération de moisissures, et on ne fume plus dans les bâtiments publics. D'autre part, la réglementation limite fortement l'exposition des travailleurs aux risques sanitaires connus.

Nous ne discuterons donc pas plus avant de ces affections, dues à des causes précises, qu'il ne faut pas confondre avec le syndrome du bâtiment malsain, thème de cette présentation.

LE SYNDROME DU BÂTIMENT MALSAIN¹

Dans les bâtiments dits "malsains" au contraire, certains symptômes, qui ne peuvent pas être reliés à des causes précises, se retrouvent fréquemment. L'Organisation Mondiale de la Santé a défini le SBM² comme une réaction de la majorité des occupants d'un immeuble à leur environnement intérieur, réaction qui ne peut pas être directement reliée à des causes évidentes telles qu'une exposition à une concentration excessive d'un contaminant connu ou à une défectuosité d'un système de ventilation.

Le SBM se caractérise par des symptômes d'inconfort et de réactions physiologiques ou sensorielles aiguës. Les personnes qui développent le SBM voient généralement leurs symptômes disparaître lorsqu'elles quittent l'immeuble incriminé. Le Tableau 1 donne la liste de ces symptômes.

Tableau 1: Liste des symptômes du syndrome du bâtiment malsain.

Symptômes les plus fréquents	Autres symptômes observés
Yeux secs, irrités, qui picotent	Yeux larmoyants
Nez bouché, respiration par le nez difficile	Nez qui coule, usage fréquent du mouchoir
Gorge sèche ou irritée	Poitrine oppressée, difficulté à respirer
Mal à la tête	Symptômes de grippe
Peau sèche	Peau irritée, éruptions
Apathie, fatigue	

Pour quantifier l'impact du bâtiment sur la santé des occupants, on demande aux occupants s'ils ressentent l'un ou l'autre de ces symptômes, et si ces symptômes disparaissent lorsque la personne quitte le bâtiment. Si c'est le cas, c'est à dire si le symptôme n'apparaît que lorsque la personne se trouve dans le bâtiment, il est réputé lié au bâtiment.

Pour comparer les bâtiments, un indice des symptômes liés au bâtiment (BSI pour Building Symptom Index) a été défini. Ce indice donne le nombre moyen de symptômes liés au bâtiment ressentis par personne. L'indice complet prend en compte tous les symptômes et prend donc une valeur entre 0 et 11.

RÉSULTATS D'ENQUÊTES

L'information donnée dans ce chapitre résulte de trois enquêtes effectuées dans des immeubles administratifs, ces trois enquêtes utilisant des méthodes d'investigation, notamment des questionnaires similaires. Deux de ces enquêtes ont été effectuées dans le cadre de programmes de recherches européens en 1993-1994 [3, 4] et 2002-2003 [5]. Ces enquêtes ont été effectuées dans plus de 200 immeubles administratifs et résidentiels situés en Europe, de la Grèce à la Finlande, en passant par l'Italie, le Portugal, la Suisse, la France, les Pays Bas, le Royaume Uni et la Suède. Une enquête identique a été aussi effectuée par des collègues de l'Université de Singapour [6]. Il faut préciser qu'aucun des bâtiments choisis ne présentait *a priori* de problème sanitaire ou était réputé malsain.

Prévalence des symptômes du SBM

La Figure 1 montre la prévalence des symptômes (pourcentage des occupants ressentant le symptôme) du syndrome du bâtiment malsain dans les immeubles résidentiels et administratifs. On note que les symptômes les plus présents ne sont pas les mêmes dans ces deux types d'immeubles, et que la prévalence des symptômes est en général plus élevée dans les bureaux que dans les logements. On note aussi que pour tous les symptômes, on trouve au moins un bâtiment à prévalence nulle. Par contre, les bâtiments dans lesquels le BSI est nul sont pratiquement inexistant.

¹ De nombreuses parties du présent document sont extraites de deux ouvrages de l'auteur [1, 2] publiés aux Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. La reproduction même partielle de ce document est dès lors soumise à l'autorisation de l'auteur ou des PPUR

² Syndrome du Bâtiment Malsain, en anglais SBS pour Sick Building Syndrom.

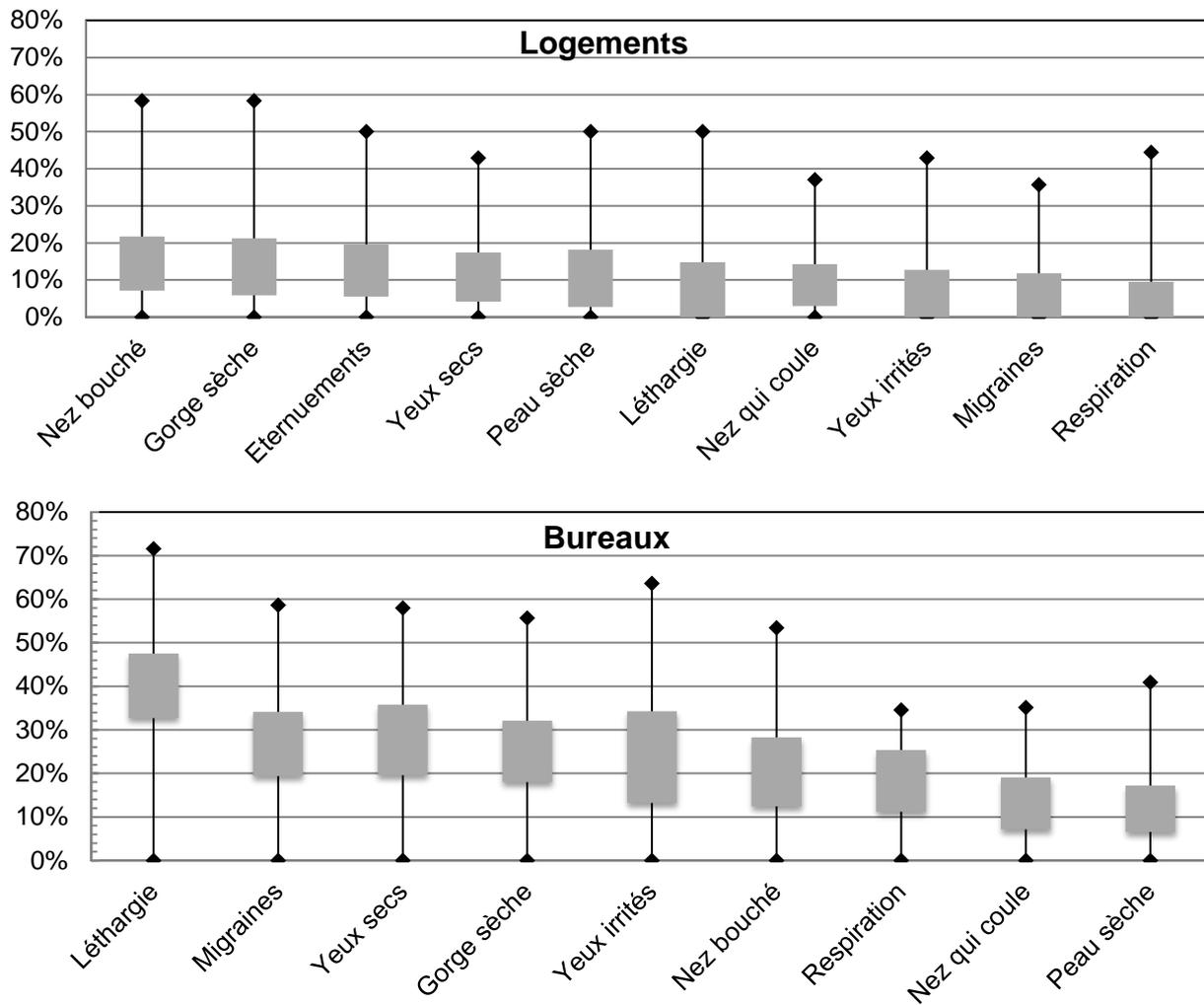


Figure 1: Prévalence des symptômes (pourcentage des occupants ressentant le symptôme) du syndrome du bâtiment malsain dans les immeubles résidentiels et administratifs. (Enquête HOPE [7, 8]). Les rectangles montrent la prévalence dans la moitié des bâtiments, alors que les barres montrent les écarts maximaux.

SBM et qualité de l'air

Nous avons tenté de trouver des causes possibles du SBM en mesurant les débits d'air neuf, la concentration de divers contaminants, en notant diverses caractéristiques du bâtiment et finalement en demandant aux occupants leur perception du confort thermique, aéraulique, acoustique et lumineux de leur logement ou place de travail. Les diagrammes qui suivent montrent quelques tentatives de corrélations. Chaque point représentant les valeurs moyennes d'un immeuble, et la droite pointillée est ajustée par la méthode des moindres carrés.

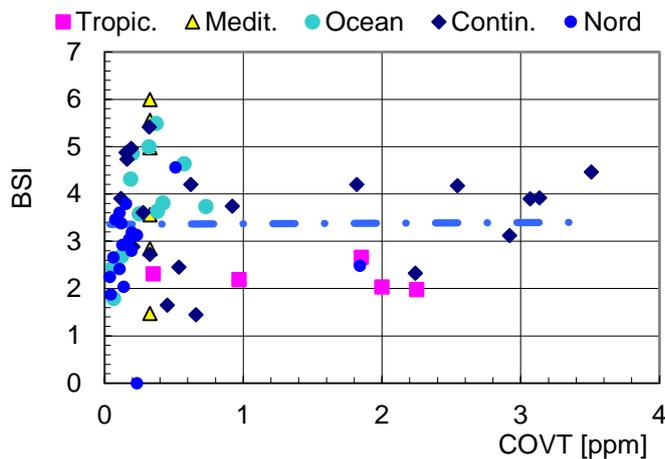


Figure 2 : Relation entre le BSI et la concentration en composés organiques volatils totaux (COVT) dans les bureaux [1].

La corrélation entre le BSI et la concentration de composés organiques volatils (COV), reflétant la pollution de l'air, est inexistante, du moins tant que celle-ci n'est pas trop importante. En effet, les concentrations nettes de COV mesurées sont toutes nettement inférieures aux limites généralement admises.

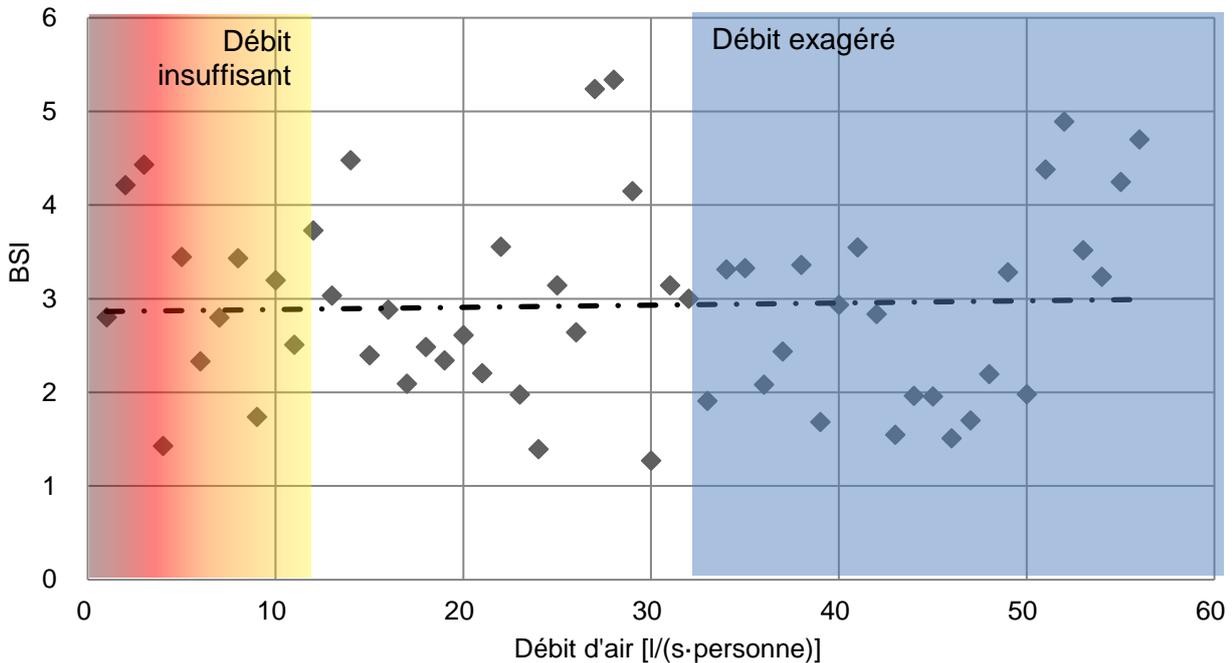


Figure 3 : Relation entre le BSI et le débit d'air neuf par occupant dans les bureaux.

Comme le montre la Figure 3, le BSI n'est pas corrélé au débit d'air par personne, même s'il est nettement au-dessous ou au-dessus des normes. Rappelons qu'un débit de 30 m³/h et personne est considéré comme suffisant si la contamination de l'air est due aux seuls occupants, alors que, dans tous les cas, il est déconseillé de descendre en-dessous de 10 m³/h et personne et considéré comme potentiellement dangereux de descendre en-dessous de 4 m³/h et personne.

SBM et contrôle de l'environnement intérieur

Les occupants ont rarement la possibilité d'agir sur leur environnement de travail (température, aération, ouverture des fenêtres, etc.), et ceci est ressenti négativement (Figure 4). Une amélioration de cette situation permettrait de diminuer le nombre relativement élevé de symptômes liés au lieu de travail qui ont été observés. En effet, le BSI semble diminuer lorsque les occupants ont l'impression de contrôler leur environnement.

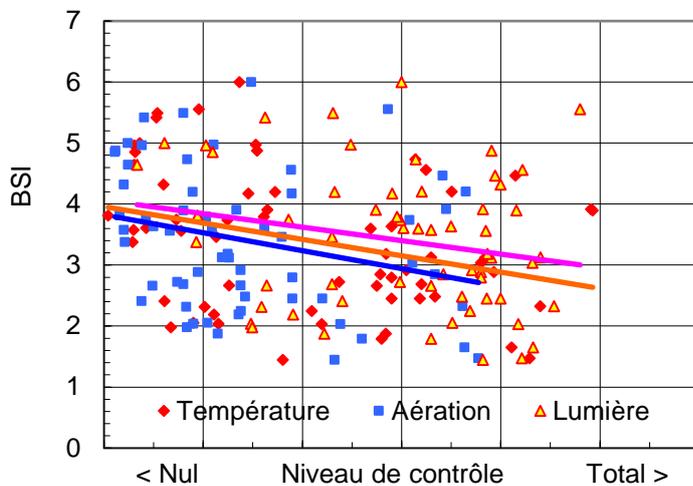


Figure 4 : BSI dans les bureaux, en fonction du niveau de contrôle, qui représente l'opinion des occupants relative à l'impression de contrôler trois aspects de leur environnement.

SBM et mode de ventilation

La Figure 5 montre que le BSI est généralement plus élevé dans les bureaux à ventilation mécanique que dans ceux à ventilation naturelle et les bâtiments les moins sains dans l'échantillon observé étaient tous à ventilation mécanique. Il ne faut toutefois pas généraliser et accuser ventilation mécanique de tous les maux. Des bâtiments sains à ventilation mécanique existent, et le BSI élevé peut être dû à d'autres causes comme l'éloignement des fenêtres, la taille des locaux ou le manque de contrôle, trois caractéristiques souvent rencontrées dans les grands bâtiments qui nécessitent une ventilation mécanique.

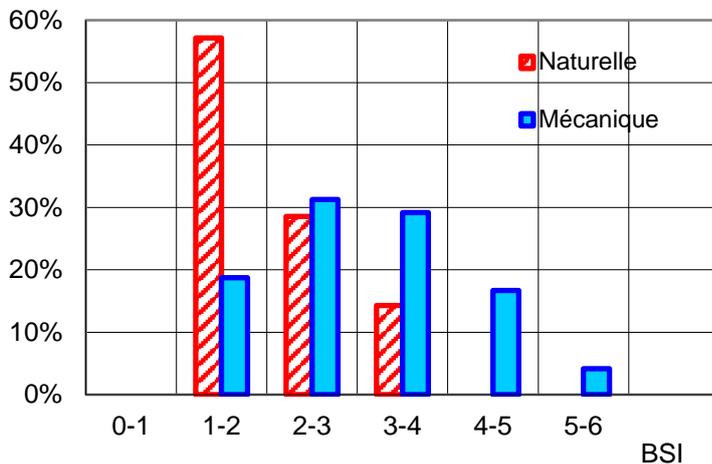


Figure 5 : Distributions du BSI dans les bureaux à ventilation mécanique et naturelle.

Le Tableau 2 qui résulte de la seconde enquête, montre que le BSI est, en moyenne, significativement plus bas dans les locaux où on peut ouvrir les fenêtres que dans ceux où elles sont scellées. Il est aussi significativement plus élevé dans les locaux à ventilation mécanique que dans ceux à ventilation naturelle. Les locaux à ventilation hybride (par ex. mécanique en hiver et naturelle en été) sont en position intermédiaire.

Tableau 2 : Moyenne des BSI, du nombre moyen d'allergies annoncées, de la perception de la qualité de l'air intérieur (QAI) et du confort (échelle de 1 = excellent à 7 = inacceptable) et consommation annuelle d'énergie par m² de plancher pour les locaux aérés de différentes manières. P est ici la probabilité que la différence soit due au hasard, donc non significative (NS).

	BSI	Allergies	QAI	Confort	kWh/m ²
Fenêtres	1.7	0.8	3.7	3.8	199
Quelques	2.4	0.9	3.9	3.9	226
Interdit	2.1	0.5	3.9	4	198
Scellées	2.5	0.9	3.9	3.7	288
P	2.5%	NS	NS	NS	NS
Naturelle	1.4	0.9	3.6	3.8	224
Mécanique	2.3	0.8	3.9	3.9	212
Hybride	1.8	0.7	3.7	3.7	213
P	0.09%	NS	NS	NS	NS

Par contre, il n'y a pas de relation significative entre le mode de ventilation et les allergies, la qualité de l'air ressentie, le confort thermique ou la consommation d'énergie.

SBM, taille du bureau et densité d'occupation

Les bureaux paysagers sont souvent créés pour mieux utiliser l'espace disponible dans un bloc entre quatre rues. On peut se poser la question sur la qualité de l'environnement intérieur dans de tels bureaux, en comparaison avec les bureaux cellulaires classiques. Il s'avère que le BSI est corrélé de manière significative avec le nombre de personnes par bureau (Figure 6) et la densité d'occupation (Figure 7).

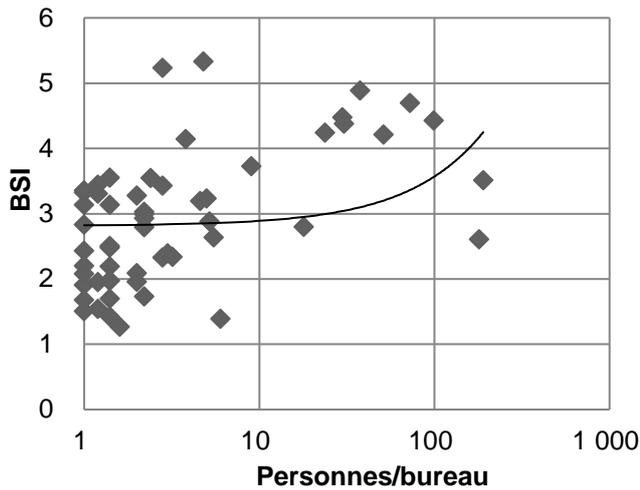


Figure 6 : BSI en fonction du nombre de personnes par bureau.

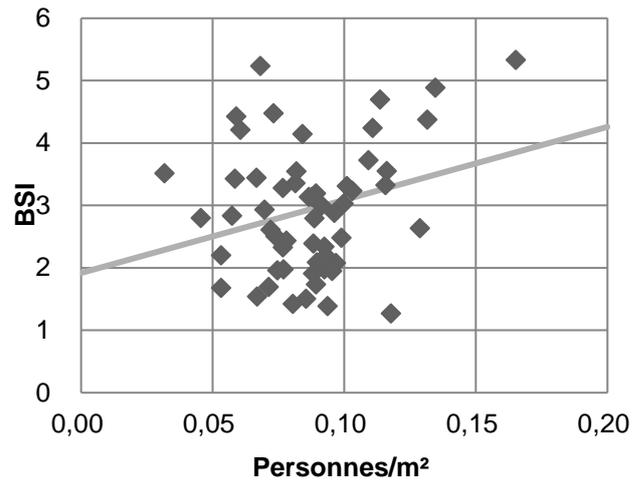


Figure 7 : BSI en fonction du nombre de personnes par surface de plancher.

En moyenne, les bureaux paysagers présentent un BSI plus élevé que les bureaux classiques. Le dépouillement de questionnaires montre aussi que les bureaux paysagers semblent moins bien acceptés par les occupants que les bureaux individuels. Il s'ensuit que, si on désire créer un bureau paysager sans SBM, il faut apporter un soin particulier à la qualité de l'environnement intérieur.

BSI et confort perçu

Nous avons observé que le confort est perçu comme un tout: tous les critères de confort (thermique, air, visuel, acoustique) sont corrélés. On voit sur la Figure 8 l'étroite corrélation entre la qualité de l'air et le confort thermique perçus, alors que ces caractéristiques sont a priori indépendantes. De même, la Figure 9 montre une bonne corrélation entre le BSI et la sensation d'inconfort. On en conclut que si un des aspects de la qualité de l'environnement intérieur est négligé, il est fort probable que les autres aspects seront aussi mal perçus.

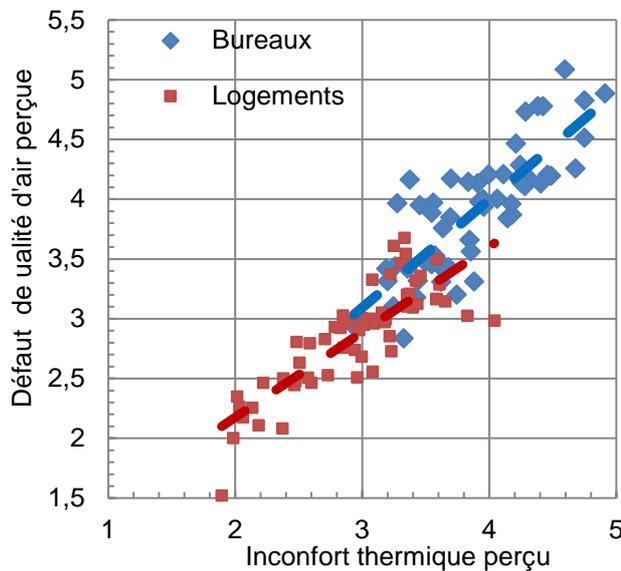


Figure 8 : Valeurs moyennes des perceptions de la qualité de l'air et du confort dans les immeubles administratifs et résidentiels.

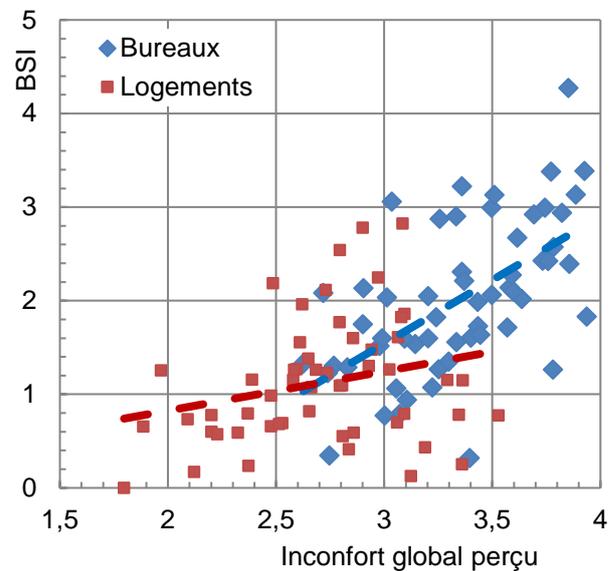


Figure 9 : BSI et valeurs moyennes de la perception du confort global dans les immeubles administratifs et résidentiels.

Consommation d'énergie, confort et BSI

On consomme de l'énergie dans les bâtiments essentiellement pour améliorer le confort, notamment en chauffant en hiver. On pourrait donc imaginer que le confort s'améliore avec la consommation d'énergie (rapportée ici à la surface de plancher chauffé pour s'affranchir des différences de taille des bâtiments). On

voit dans la Figure 10 qu'il n'en est rien, et que dans les logements, l'inconfort augmente même avec la consommation.

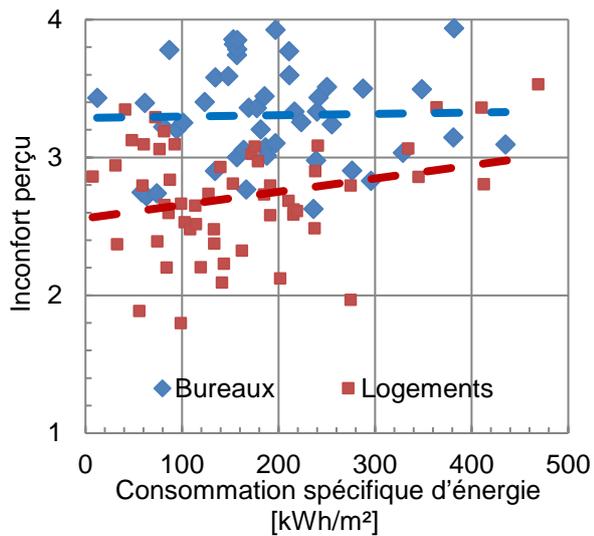


Figure 10 : Valeurs moyennes de l'inconfort perçu et consommation spécifique annuelle d'énergie

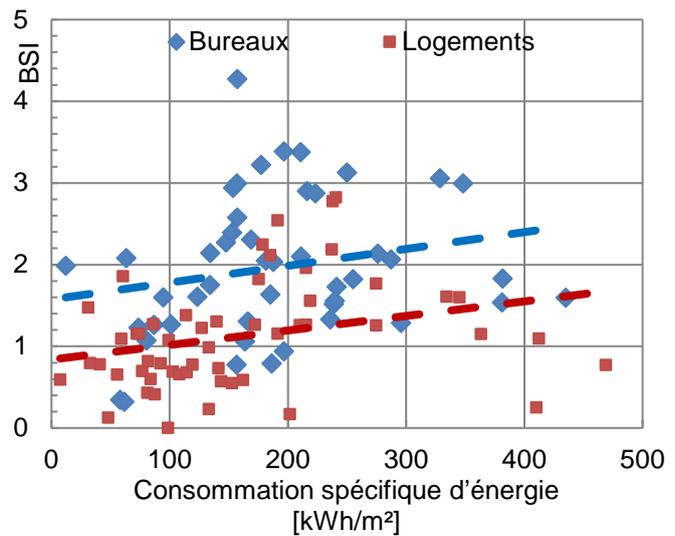


Figure 11 : BSI et consommation spécifique annuelle d'énergie.

Une journée d'absence (environ 400.-) coûte de deux à huit fois plus cher que le coût annuel du chauffage de la place de travail (environ 50.- à 200.-). De ce fait, le maître de l'ouvrage est prêt à acquiescer de coûteuses installations de conditionnement et à dépenser de l'énergie pour améliorer les conditions de travail. En moyenne sur les 160 bâtiments examinés en Europe, le résultat semble décevant: on note sur la Figure 11 une corrélation significative positive entre l'indice de dépense d'énergie et le nombre de symptômes ressentis: plus on consomme d'énergie, plus les occupants sont malades...

Ce résultat n'est en fait pas surprenant: on peut s'attendre à ce qu'un bâtiment mal conçu et médiocrement exploité soit moins sain et consomme plus d'énergie qu'un bâtiment bien conçu et exploité avec compétence. Il est aussi possible que l'on cherche à réagir aux plaintes exprimées dans les bâtiments à problèmes en augmentant la température de chauffage ou la climatisation, ce qui augmente la consommation.

A NE PAS FAIRE!

Quelles sont les raisons des inconforts et des symptômes ressentis?

Il est maintenant établi qu'il n'y a pas une seule cause au SBM, et que les bâtiments dits «malsains» présentent plusieurs problèmes peu évidents dont l'ensemble rend les personnes les plus sensibles malades. Le SBM résulte très probablement de la conjonction d'au moins trois facteurs: inconfort, stress, et pollution.

- L'inconfort peut résulter d'une température trop haute ou trop basse pour l'habillement et l'activité de l'occupant, d'une humidité ou au contraire d'une sécheresse excessive, d'un éclairage inadéquat ou d'un bruit excessif. D'autres facteurs, notamment le stress et la pollution, peuvent influencer le confort perçu, qui est en fait une sensation de bien être général.
- Le stress provient généralement d'insatisfaction au travail, d'une trop haute densité d'occupation, de manque de sphère privée et de manque de contrôle sur l'environnement.
- La pollution résulte de mauvais entretien, de la saleté, des sources de pollution intérieure et extérieure, d'humidité excessive et/ou d'une aération insuffisante.

En résumé, pour réussir un bâtiment malsain, il suffit de réunir quelques-unes des conditions suivantes (la liste n'est pas exhaustive!):

Lors de la conception et la construction du bâtiment:

- n'accorder que peu d'importance aux occupants, à leur confort hivernal et estival

- chercher une occupation des locaux la plus rentable possible
- ne laisser aucune possibilité aux occupants de modifier leur environnement
- sceller les fenêtres
- si une ventilation mécanique est prévue, ne pas y accorder un soin particulier pour la conception, la construction et l'entretien
- utiliser des matériaux émettant des composés toxiques (solvants, formaldéhyde, pesticides, plastifiants, etc.)
- négliger l'isolation acoustique et l'acoustique interne
- négliger l'éclairage naturel et artificiel.

Lors de l'exploitation du bâtiment

- n'accorder aucune importance aux plaintes ou aux propositions
- interdire d'ouvrir les fenêtres
- sur-occuper les locaux
- installer des appareils polluants à l'intérieur
- négliger l'entretien des locaux et des installations.

Le quartier de la Défense, à Paris ou la prestigieuse Prime Tower de Zurich (Figure 12), illustrent bien ce que l'on peut faire en laissant libre cours à l'imagination sans se préoccuper de l'habitabilité. Dans ce genre de bâtiments, le climat intérieur est complètement conditionné, et l'éclairage artificiel est généralisé ce qui les rend difficilement utilisables, voire inutilisables. Par exemple, la Prime Tower a dû être évacuée suite à une simple panne d'électricité!³



Figure 12: La Défense, à Paris, la Prime Tower de Zurich, deux exemples où l'expression a primé sur la protection...

ALORS QUE FAIRE?

Les enjeux

Vitruve a énoncé trois piliers de l'architecture, ou trois qualités qu'un bâtiment doit avoir de manière équilibrée :

- | | |
|---------------------------------------|---|
| Voluptas ou Venustas ⁴ : | être beau, esthétiquement bien conçu |
| Firmitas ou Necessitas ¹ : | tenir debout, au besoin pendant longtemps |
| Comoditas : | être confortable et fonctionnel |

La première qualité sont particulièrement bien traitées à l'atelier et dans les traités d'architecture, et la seconde dans les manuels de construction et de statique. Ce document ne concerne donc que la troisième qualité, **comoditas**.

Lors de la conception et de l'utilisation d'un bâtiment, les intervenants ont des objectifs parfois différents:

- le promoteur cherche la rentabilité,

³ <http://www.tdg.ch/suisse/La-plus-haute-tour-de-Suisse-a-ete-evacuee-a-Zurich/story/25157944>

⁴ Ce mot change suivant les sources !

- la compagnie propriétaire aussi bien que l'architecte désire que le bâtiment ajoute à son prestige,
- le locataire désire avoir le meilleur rapport performance/prix
- l'occupant espère se trouver bien dans ses locaux
- la société a tout intérêt à respecter les critères d'un développement durable.

En fait, tous ces enjeux doivent être pris en compte lors de la conception, de la construction et de l'utilisation du bâtiment. Il se trouve que, à condition de réfléchir correctement, c'est parfaitement possible et que ces objectifs ne sont pas contradictoires. Il n'en reste pas moins que le bâtiment est d'abord une protection, et ensuite une expression!

Le bâtiment est construit avant tout pour être confortable et sain. C'est en fait sa raison d'être. Le bâtiment doit protéger les occupants de l'environnement extérieur, assurer un climat et une qualité d'air agréables à l'intérieur, et fournir des services tels que le transport, des produits et des communications. Rappelons que l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) définit la santé comme un état de bien être physique, mental et social total et non simplement comme une absence de maladie ou d'infirmité.

Un des objectifs des professionnels du bâtiment et des occupants est de limiter ces sources de SBM et de malaise autant que possible. En fait, dans l'idéal, le bâtiment devrait être non seulement pas malsain, mais encore parfaitement sain, apportant de la joie de vivre à ses occupants.

Pour apporter en toute circonstance un minimum de bien être à ses occupants, le bâtiment doit être construit de manière à apporter naturellement, sans aucune installation technique, **un confort au moins égal à celui de l'extérieur**. Sa conception et sa construction doivent donc être adaptées au climat local.

Méthodes actives et passives pour assurer le confort

Pour assurer une bonne qualité de l'environnement intérieur, on peut appliquer des mesures passives et des mesures actives.

- Les mesures passives sont des mesures architecturales et constructives qui permettent d'atteindre naturellement le but poursuivi sans apport d'énergie, ou presque. Leur conception dépend fortement du climat et de l'environnement locaux.
- Les mesures actives ou technologiques permettent d'atteindre le but poursuivi par des actions mécaniques, en consommant de l'énergie pour compenser les défauts du bâtiment ou compléter les mesures passives.

Voici quelques exemples de mesures passives :

- **La compacité du bâtiment** : En climat froid, les déperditions de chaleur augmentent avec la surface exposée de l'enveloppe du bâtiment, et la compacité des formes est avantageuse de ce point de vue. Il faut toutefois pondérer ce critère par les besoins en éclairage naturel, qui nécessitent des espaces proches de l'enveloppe.
- **La distribution des volumes** doit être adaptée au climat. Les grandes hauteurs sont confortables en climat chaud, alors que les petits volumes sont plus faciles à chauffer. Les mezzanines et les ouvertures entre plusieurs étages favorisent la ventilation par effet de cheminée, mais augmentent aussi les variations de température entre le haut et le bas des espaces habités.
- **L'orientation du bâtiment** par rapport au soleil, aux vents dominants, à la vue, a une influence importante sur le confort en général, et une influence non négligeable sur la consommation d'énergie.
- **L'emplacement des ouvertures** détermine l'éclairage et la ventilation naturels. Par exemple une ouverture tout en haut permet d'évacuer l'air chaud. Des fenêtres hautes éclairent mieux le fond des pièces que des vitrages larges.
- **L'isolation thermique** protège du climat extérieur et supprime les risques de moisissure et de condensation en climat froid. Si elle est placée à l'extérieur de la structure, elle la protège des variations rapides de température, stabilise la température intérieure, favorise l'utilisation des gains solaires, permet le refroidissement passif.
- **La ventilation naturelle** est généralement mieux acceptée par les habitants que la ventilation mécanique. Elle permet des débits nettement supérieurs à ceux que la ventilation mécanique peut atteindre, ce qui facilite l'évacuation rapide de grandes quantités de polluants ou de chaleur et améliore nettement l'efficacité du refroidissement passif.
- **Le refroidissement passif** consiste à refroidir la structure du bâtiment la nuit pour éviter les surchauffes les jours de canicule. Pour cela, on utilise de grandes ouvertures pendant toute la nuit, une des ouvertures étant située le plus haut possible.

- **Le chauffage solaire passif** consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire entrant dans le bâtiment par les fenêtres, ou parfois par des dispositifs ad hoc, pour contribuer au chauffage des locaux.
- **L'éclairage naturel** est parfaitement adapté à nos yeux, bien accepté, voire recherché par les occupants. A éclairage égal, il chauffe moins que l'éclairage artificiel.
- **L'isolation et l'absorption acoustiques** assurent une ambiance acoustique agréable dans les locaux, évitent les interférences désagréables entre voisins et réduisent l'impact des bruits extérieurs.

Et voici quelques exemples de mesures actives :

- **Le chauffage local ou central** reste indispensable dans les climats froids pour assurer une température confortable en hiver.
- **La ventilation mécanique** supplée à la ventilation naturelle ou la complète dans les locaux de grande dimension ou à fort taux d'occupation. Elle permet aussi de récupérer la chaleur dans l'air extrait.
- **Le conditionnement d'air** permet de refroidir les locaux dans lesquels la charge thermique est trop élevée. On peut aussi utiliser à cet effet les parois radiantes (par exemple des plafonds froids)
- **L'éclairage artificiel** est bien connu et reste indispensable pour voir la nuit !
- **Le contrôle, la régulation, la domotique** qui agissent sur les installations actives ou des éléments passifs pour automatiser leur fonctionnement en cherchant un optimum aussi bien pour le bien être des occupants que pour la consommation d'énergie.
- **Les écrans** montrant des paysages ou d'autres images, peuvent être utilisés pour donner l'illusion d'ouvertures.
- **La musique d'ambiance**, parfois utilisée pour couvrir des bruits désagréables.

Les mesures passives sont généralement bon marché, consomment peu ou pas d'énergie et par définition ne peuvent pas tomber en panne. Leur conception dépend fortement du climat et de l'environnement locaux. Elles sont donc influencées (à part les mesures acoustiques) par les conditions météorologiques et ne peuvent pas toujours fournir les prestations souhaitées.

Les mesures actives sont bien adaptées aux besoins (c'est leur raison d'être principale), du moins quand elles sont bien conçues, construites et mises en service. Ces mesures utilisent des méthodes connues appliquées par des professionnels (chauffagistes, éclairagistes, installateurs, ingénieurs, etc.). Souples et relativement indépendantes des conditions météorologiques, elles permettent de fournir en permanence les prestations souhaitées, voire de rattraper des erreurs de conception. Par contre, elles sont souvent chères, énergivores et peuvent tomber en panne. Si une installation active faillit, l'inconfort sera nettement plus grave dans un bâtiment technologique où l'installation active a l'entière charge du confort que dans un bâtiment passif où elle ne fait qu'améliorer un confort dû en grande partie aux mesures passives.

Les avantages et inconvénients des mesures passives et actives sont résumés dans le Tableau 3. Les avantages sont en vert et les inconvénients en rouge. On remarque qu'à chaque avantage d'un type de mesures correspond un inconvénient de l'autre et vice versa. Les mesures passives et actives sont donc complémentaires.

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des mesures passives et actives.

Mesures passives	Mesures actives
Bon marché	Chères
Consomment peu d'énergie	Énergivores
Ne tombent pas en panne	Des pannes sont possibles
Difficiles à contrôler	Faciles à contrôler
Parfois inutilisables	Disponibles

Les mesures actives ont été privilégiées quand l'énergie n'était pas chère (années 70) mais maintenant, les mesures passives sont préférables pour des raisons de coût et de consommation d'énergie. Elles ne peuvent toutefois pas toujours garantir des conditions confortables, donc la stratégie à adopter consiste à aller aussi loin que raisonnablement possible avec les mesures passives, et de pallier les insuffisances résiduelles par des installations actives dont les dimensions seront alors réduites. Cette stratégie permet souvent d'avoir plus de choix quant aux types et aux emplacements des installations actives.

Pour construire un bâtiment performant, l'architecte peut soit compter sur son expérience et imiter des constructions existantes et connues comme performantes, soit créer un projet innovant et étudier à fond ses

performances prévisibles **avant de le construire!** Des outils informatiques sont actuellement disponibles, qui permettent de prédire la consommation d'agents énergétiques, la température, l'éclairage naturel et artificiel, le bruit, le débit d'air, la concentration de polluants, etc. d'un bâtiment ou d'un local sur la base du projet.

Quelques exemples

Le nouveau bâtiment de l'office fédéral de la statistique (Figure 13), situé à côté de la gare de Neuchâtel, veut être un exemple. Il a été conçu comme un bâtiment à ventilation naturelle à hauts gains solaires passifs et actifs (65% des besoins), ce qui est rare dans un grand immeuble administratif situé en ville. En été, le refroidissement par ventilation naturelle assure un climat confortable dans les bureaux et circulations représentant plus de 80 % des espaces. Les ouvertures en façades, protégées des intempéries, laissent entrer l'air qui traverse les locaux occupés pour s'échapper ensuite vers le haut du bâtiment par les couloirs, les cours intérieures et les superstructures [9].

En revanche, les autres espaces, qui sont d'une part des locaux à hauts gains internes tels que les salles de réunion, le restaurant, certains locaux techniques, le sous-sol et les toilettes sont ventilés mécaniquement. L'installation de chauffage comprend 1200 m² de capteurs solaires thermiques combinés avec un stockage saisonnier and un réservoir d'eau de 2400 m³, la récupération des gains du centre de calcul et une chaudière à gaz.



Figure 13 : Office Fédéral de Statistiques, Neuchâtel. Architectes : Bauart, Bern, 1999, ingénieurs climat : Sorane SA, Lausanne. Photo Ruedi Walti, Basel.

Presque tous les matériaux de construction ont été choisis en fonction de leurs caractéristiques écologiques : ossature béton, allèges en panneaux sandwich bois ciment, et isolation cellulose, protégées par du verre, isolation en verre cellulaire pour la toiture, cloisons internes en Placoplâtre, parquets huilés. L'eau de pluie est retenue sur les toitures en partie par une végétalisation, et en partie par des bassins de rétention. Elle est aussi récoltée et stockée pour les toilettes et les postes de nettoyage.

Ce bâtiment se situe en tête, du point de vue de la santé et du bien être des occupants, des bâtiments administratifs examinés en Suisse dans le cadre d'un projet de recherches Européen [4].



Figure 14 : A l'EPFL, le Rolex Learning Centre et le bâtiment BC.

A l'EPFL, le projet du Rolex Learning Center (Figure 14 de gauche) a certes gagné le concours d'idées, mais a nécessité de sérieuses études non seulement pour pouvoir le construire, mais aussi pour le rendre habitable. La répartition des activités, l'arrangement des fenêtres, les revêtements de surface intérieurs et les protections solaires ont notamment été modifiés pour rendre les espaces confortables.

Dans le bâtiment BC de l'EPFL (Figure 14 de droite), le concept de ventilation a été particulièrement bien étudié: la ventilation naturelle est utilisée partout où c'est possible, les ouvertures sont construites pour pouvoir rester ouvertes la nuit en été en toute sécurité, ce qui permet de rafraîchir passivement le bâtiment. Les locaux borgnes sont évidemment équipés de ventilation mécanique, et ceux à forte charge thermique sont refroidis artificiellement en utilisant, comme le reste du site, l'eau du Léman.

CONCLUSIONS

Avec les connaissances actuelles [1, 2, 10, 11], il est parfaitement possible de réussir un bâtiment sain, beau, confortable et à basse consommation d'énergie, ceci à un coût généralement inférieur à celui de certains bâtiments de prestige où le concepteur a parfois oublié les occupants. Pour cela, il faut intégrer les besoins de l'occupant, notamment son confort et sa santé, dans la conception, la construction et l'exploitation du bâtiment. On peut même affirmer que, à l'heure actuelle, une grande négligence est nécessaire pour obtenir un bâtiment malsain

Les économies réalisables en Europe par l'amélioration de la qualité de l'environnement intérieur estimées en 1994 par un groupe d'experts [4] sont loin d'être négligeables:

Par réduction du nombre d'allergies	3 à 6 milliards d'Euros
Par réduction du SBM	15 à 45
Par augmentation de la productivité	30 à 240
Prévention des dommages	10 à 20
Économie d'énergie dans les bâtiments	100 à 150

Ces économies compensent largement les petits efforts supplémentaires pour obtenir un bâtiment que les Français qualifient de "Haute Qualité Environnementale".

RÉFÉRENCES

1. Roulet, C.-A., *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. 2004, Lausanne: PPUR. 368.
2. Roulet, C.-A., *Eco-confort - Pour une maison saine et à basse consommation d'énergie*. 2012, Lausanne: PPUR. 198.
3. Bluysen, P.M., et al. *European Audit Study in 56 Office Buildings: Conclusions and Recommendations*. in *Healthy Buildings '95*. 1995. Milano.
4. Bluysen, P.M., et al., *European Audit Project to Optimise Indoor Air Quality and Energy Consumption in Office Buildings. Final report of Contract Jou2-CT92-022,, 1995, TNO Bouw,, Delft (NL)*.
5. Bluysen, P.M., et al. *European Project HOPE (Health Optimisation Protocol For Energy-Efficient Buildings)*. in *Healthy Buildings*. 2003. Singapore.
6. Zuraimi, M.S., et al., *A comparative study of VOCs in Singapore and European office buildings*. *Building and Environment*, 2006. **41**(3): p. 316-329.
7. Cox, C., *Health Optimisation Protocol for Energy-efficient Buildings*, 2005, TNO Bouw: Delft. p. 82.
8. Roulet, C.-A., et al., *Perceived Health and Comfort in Relation with Energy Use and Building Characteristics*. *Building Research Information*, 2006. **34**(5): p. 467-474.
9. Jaboyedoff, P., D. Aiulfi, and D. Bicklé. *Office Fédéral de la Statistique à Neuchâtel: Nouveau Bâtiment, Mise en Service et Optimisation en Exploitation Réelle*. in *CISBAT 2001*. 2001. Lausanne: EPFL.
10. Roulet, C.-A., et al., *Health, Comfort, and Energy Performance in Buildings - Guidelines to achieve them all 2005*, EPFL, LESO: Lausanne. <http://hope.epfl.ch/guidelines/HOPEGuidelines7.pdf>
11. SIA, *SIA 180: Protection thermique, protection contre l'humidité et climat intérieur dans les bâtiments*, 2014, SIA: Zurich.