

Surveillance du CO₂ et qualité de l'air intérieur.



Origine et effets sur la santé humaine.

Le dioxyde de carbone est un gaz incolore et inodore. Il est un élément naturel de l'air ambiant dans une concentration d'environ 400 ppm (parts per million). Le CO₂ se forme lors de la combustion complète de substances contenant du carbone avec un apport d'oxygène suffisant. Il se forme également dans les organismes vivants comme produit de décomposition de la respiration cellulaire.¹ Des concentrations élevées à partir de 1000 ppm peuvent provoquer des troubles considérables de l'état général (maux de tête, fatigue, manque de concentration).²

Le dioxyde de carbone se forme dans les cellules du corps (dans une quantité de 0,7 kg par jour) et pénètre ensuite dans les capillaires environnants par diffusion. Il est transporté dans le sang après sa combinaison chimique avec des protéines tels que l'hémoglobine ou sous forme dissoute. La plus grande partie du CO₂ est physiquement dissoute, seule une petite partie est transformée en gaz

carbonique par l'anhydrase carbonique dans les hématies ; ce gaz carbonique se décompose en ions d'hydrogène et de bicarbonate dans un milieu aqueux. Le dioxyde de carbone est expiré par la membrane alvéolaire des poumons. Une fonction physiologique essentielle du dioxyde de carbone dans l'organisme consiste à réguler la respiration par les chimiorécepteurs de l'aorte et de la moelle allongée qui stimulent le centre respiratoire du tronc cérébral sous forme de réflexe. Une concentration élevée de CO₂ dans l'air inspiré augmente la fréquence de respiration et le volume d'inspiration. Le CO₂ a un effet de dilatation sur les bronches ce qui augmente le volume mort (l'espace du système respiratoire qui ne participe pas aux échanges gazeux des poumons). Mais l'effet de dilatation du CO₂ sur les artérioles périphériques et centrales ne provoque pas de chute de tension sanguine car l'augmentation de la sécrétion d'adrénaline exerce un effet compensatoire de vasoconstriction.³

Effets de différentes concentrations de CO₂

Concentration	Effet
350 – 450 ppm	Concentration atmosphérique typique
600 – 800 ppm	Qualité fiable de l'air intérieur
1000 ppm	Qualité encore fiable de l'air intérieur
5000 ppm	Concentration maximale au poste de travail pendant 8 heures
6000 – 30 000 ppm	Critique, exposition de courte durée uniquement
3 – 8 %	Fréquence de respiration augmentée, maux de tête
> 10 %	Malaise, vomissement, perte de connaissance
> 20 %	Perte de connaissance rapide, mort

Fig.1 : Effets de différentes concentrations de CO₂

Le CO₂ dans l'air intérieur.

Le CO₂ est considéré comme paramètre déterminant de la pollution de l'air causée par l'homme car l'augmentation de la concentration de CO₂ à l'intérieur est en corrélation avec l'augmentation des émanations malodorantes de l'homme. Ainsi, le taux de CO₂ dans l'air intérieur reflète directement l'intensité d'utilisation d'un local. Il convient donc aussi comme repère d'orientation pour d'autres domaines de régulation, p.ex. pour le dimensionnement de centrales de traitement d'air ou les instructions d'aération concernant les locaux densément occupés à aération naturelle, tels que les salles de classe ou les salles de conférence.⁴

La concentration de CO₂ dans les locaux utilisés dépend essentiellement des facteurs suivants :

- **Nombre de personne dans le local, volume du local**
- **Activité des personnes présentes dans le local**
- **Temps que les utilisateurs du local y passent**
- **Processus de combustion à l'intérieur**
- **Renouvellement d'air ou débit d'air extérieur**

Une augmentation rapide de la concentration de CO₂ dans l'air intérieur est la conséquence typique de la présence d'un grand nombre de personnes dans des locaux relativement petits (p.ex. des salles de conférence, de réunion ou de classe) en cas de faible renouvellement d'air. Des concentrations de CO₂ critiques sont généralement accompagnées d'autres phénomènes de pollution, notamment en substances odorantes, provenant entre autres de la transpiration ou de produits cosmétiques ainsi que de micro-organismes. En cas de construction étanche à l'air et donc de très faible taux de renouvellement d'air, la concentration de CO₂ peut même augmenter en présence d'un petit nombre de personnes (p.ex. dans les habitations ou les bureaux). Dans les deux cas, le CO₂ influence directement le sentiment de bien-être des personnes dans le local. L'European Collaborative Action (ECA) conclut aux taux d'insatisfaction suivants sur la base de modélisations : dès un taux de 1000 ppm, il faut s'attendre à environ 20 % d'utilisateurs insatisfaits du local et ce nombre augmente à 36 % à partir de 2000 ppm.⁵

Alors que les salles de conférence ou de réunion ne sont généralement utilisées qu'occasionnellement et pour de courtes périodes, la concentration de CO₂ dans les salles de classe doit être considérée de manière particulièrement critique en raison de la durée de séjour de plusieurs heures des élèves et des enseignants. Des études en cours ou terminées dans plusieurs Länder allemands concernant la charge en dioxyde de carbone de l'air intérieur dans les salles de classe ont démontré de manière cohérente des déficits considérables en ce qui concerne une qualité suffisante de l'air intérieur dans les écoles.⁶

Débit d'air extérieur, taux de ventilation et feu tricolore de ventilation.

Le débit (volumétrique) d'air extérieur ou le taux de ventilation décrit le volume d'air extérieur qui entre dans un local ou dans un bâtiment (en l/s ou en m³/h), soit par l'action d'un système de ventilation, soit par infiltration à travers l'enveloppe d'un bâtiment.

Pour les locaux destinés au séjour de personnes, les débits d'air extérieur nécessaires sont indiqués par référence aux personnes en l/s par personne ou en m³/h par personne. Le taux de renouvellement d'air (n en 1/h) est le quotient du volume d'air frais en m³/h et du volume du local en m³.⁷

Le climat ambiant du local est ressenti comme agréable si la température se situe entre 20 et 23 °C et l'humidité de l'air entre 30 et 70 %HR. Cependant, pour les personnes allergiques aux acariens, l'humidité recommandée ne devrait pas dépasser 50 %HR. Le contrôle occasionnel avec un hygromètre étalonné est recommandé. Les courants d'air dans le local ne devraient pas dépasser, en fonction de la saison, une valeur de 0,15 m/s (en hiver) ou de 0,25 m/s (en été).

Lorsqu'on entre dans une pièce où se trouvent plusieurs personnes, on a parfois l'impression que l'air est de mauvaise qualité. Cette impression provient du dioxyde de carbone expiré, de la vapeur d'eau et des odeurs corporelles.⁸

Il y a 150 ans déjà, le chimiste et hygiéniste allemand **Max von Pettenkofer** signala le fait de « l'air vicié » après un séjour de longue durée dans les pièces d'habitation et les établissements d'enseignement et identifia le dioxyde de carbone comme élément déterminant pour l'évaluation de la qualité de l'air intérieur. Il fixa la valeur de référence de 0,1 % vol. de CO₂ (= 1000 ppm) à l'intérieur, le nombre dit de Pettenkofer, qui a longtemps été applicable. A partir de cette concentration, les premiers troubles de l'état général tels que des maux de tête, de la fatigue et un manque d'attention peuvent apparaître.⁹

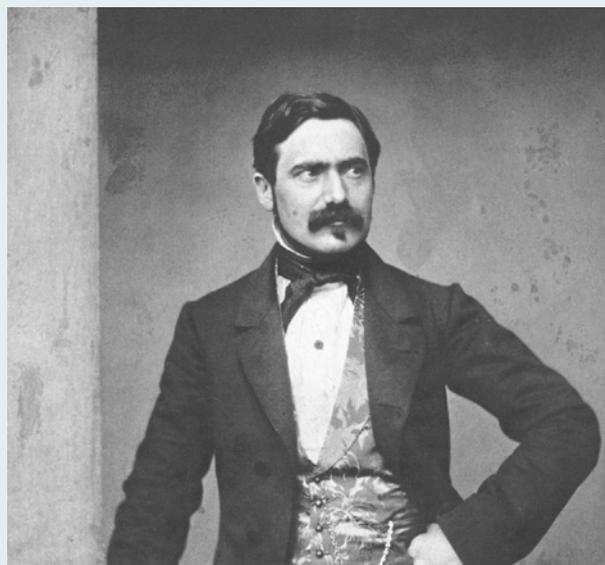


Fig. 2 : Max von Pettenkofer

Le feu tricolore de ventilation est très utile pour l'évaluation actuelle du taux de CO₂ dans l'air intérieur :

	Concentration de dioxyde de carbone (ppm)	Feu tricolore de ventilation	Evaluation hygiénique	Recommandations
Concentrations inférieures à 1000 ppm de dioxyde de carbone dans l'air intérieur : inoffensives	< 1000	Vert	Inoffensif du point de vue hygiénique (valeur cible)	Aucune action nécessaire
Concentrations entre 1000 et 2000 ppm : anormales	1000 – 2000	Jaune	Anormal du point de vue hygiénique	Mesures de ventilation (augmenter le débit d'air extérieur et le renouvellement d'air) Vérifier et améliorer le comportement d'aération
Concentrations supérieures à 2000 ppm : inacceptables	> 2000	Rouge	Inacceptable du point de vue hygiénique	Vérifier la possibilité d'aération du local Vérifier le cas échéant des interventions supplémentaires

Fig. 3 : Evaluation du taux de CO₂ dans l'air intérieur avec le feu tricolore de ventilation.¹⁰

Syndrome du bâtiment malsain.



Le « syndrome du bâtiment malsain » (SBM) correspond au terme anglais de « Sick Building Syndrome » (SBS). Le terme anglais est cependant employé dans deux significations différentes. D'une part, il désigne les bâtiments qui déclenchent des maladies chez les personnes qui y travaillent, d'autre part, les bâtiments sont qualifiés eux-mêmes de « malsains ».

Le syndrome du bâtiment malsain est souvent dû à la climatisation ou à une mauvaise qualité de l'air dans les bâtiments. Il existe un vaste éventail de symptômes, tels que : irritation des yeux, du nez et de la gorge ; sentiment que les muqueuses et la peau se dessèchent ; fatigue « mentale » (terme anglais : « mental fatigue ») ; infections fréquentes des voies respiratoires et toux ; enrouement, détresse respiratoire, démangeaisons et hypersensibilité non spécifique.

Une étude américaine réalisée dans des bâtiments équipés

de centrales de traitement d'air a pu prouver une corrélation positive, significative au niveau statistique, entre les troubles tels qu'une gorge sèche et des irritations des muqueuses et l'augmentation de la concentration de CO₂, même dans la plage de concentration absolue inférieure à 1000 ppm.

Des études récentes ont montré que le coût pour remédier aux problèmes associés à un mauvais climat ambiant à l'intérieur est souvent plus élevé pour l'employeur, le propriétaire du bâtiment et la société que les dépenses énergétiques pour les bâtiments concernés. Il a également été prouvé qu'une qualité appropriée du climat intérieur peut améliorer les performances globales au travail et à l'apprentissage et réduire les jours d'absence.¹¹

La qualité de l'air intérieur dans les écoles.



Rien qu'en Allemagne, il y a 34 000 écoles générales et 10 000 écoles professionnelles. Par conséquent, la surveillance du CO₂ a une importance particulière dans ce domaine. L'air extérieur présente en moyenne un taux de dioxyde de carbone de 400 ppm.¹²

Dans une salle de classe, ce taux augmente à plus de 1500 ppm pendant une heure de cours par la seule respiration des élèves et des professeurs, au bout de 90 minutes, on a déjà constaté des valeurs de 2700 ppm par des mesures. En fin de compte, cela provoque plus de fatigue et une diminution de l'attention – des symptômes qui font directement obstacle à l'apprentissage et à l'enseignement.¹³

Une étude réalisée aux Etats-Unis conclut que les concentrations de CO₂ dans les salles de classe ont une influence directe sur la présence des élèves.

Une augmentation de 1000 ppm de CO₂ provoque une augmentation du taux d'absentéisme de 10 à 20 %. Selon une autre étude, chaque augmentation de 100 ppm de CO₂ réduit la présence annuelle moyenne des élèves de 0,2 %.¹⁴ On a également constaté qu'une augmentation du taux de ventilation peut réduire les absences pour maladie de 10 à 17 %.¹⁵

Le CO₂ a donc une influence sur le taux de présence dans les écoles étudiées. L'envergure de cette influence n'est cependant pas claire. D'autant plus qu'il faut aussi tenir compte des conditions individuelles des écoles.

Après l'introduction du décret sur les économies d'énergie en Allemagne en 2002 (amendé en 2007), tous les acteurs concernés doivent faire face à de nouveaux défis concernant la rénovation des établissements scolaires.

L'enveloppe des bâtiments et les fenêtres sont rendues étanches de plein gré pour répondre aux exigences énergétiques. Le revers de la médaille, c'est le risque d'enrichissement en substances chimiques et biologiques dans l'air intérieur si la ventilation est insuffisante.¹⁶

Bien que le problème du dioxyde de carbone dans les locaux utilisés par un grand nombre de personnes soit connu depuis longtemps, aucune solution convaincante n'a été trouvée jusqu'à présent pour le secteur scolaire. En même temps, il n'y a pas de règlement clair concernant la compétence et qui détermine comment, quand et par qui les fenêtres des salles de classe doivent être ouvertes, notamment en hiver. La conséquence évidente : des valeurs très élevées de CO₂ (3000 ppm et plus). Cela a également un effet immédiat sur le risque d'infection dans les écoles : aux lieux présentant une forte teneur en CO₂, on trouve également un nombre de germes particulièrement élevé.¹⁷

En 2003, les scientifiques américains Stephen Rudnick et Donald Milton ont par exemple examiné le risque d'infection de grippe dans une salle de classe. 30 personnes, dont une personne avait une grippe aiguë, sont restées dans la salle de classe pendant quatre heures. Le résultat : à un teneur en CO₂ de 1000 ppm, cinq personnes se sont infectées, à 2000 ppm, il y a eu douze personnes et à 3000 ppm même 15.¹⁸

La situation actuelle dans de nombreuses écoles montre que les seuls rappels d'aérer les salles de classe régulièrement et intensivement ne suffisent plus partout pour maîtriser le problème du CO₂. Des mesures techniques de ventilation deviennent alors indispensables pour atteindre une qualité de l'air durable et indépendante des utilisateurs avec une faible concentration en CO₂.¹⁹

Directives concernant le taux de CO₂ dans l'air intérieur.

En Allemagne et en Europe, il n'existe aucune réglementation complète et obligatoire relative à la qualité requise de l'air intérieur. Mais il existe une série de valeurs d'évaluation, appelées p.ex. valeurs de référence, valeurs d'orientation ou valeurs cible. La valeur de référence hygiénique valable aujourd'hui en Allemagne selon DIN 1946 partie 2 est une valeur de CO₂ de 0,15 % vol. (= 1500 ppm). Les valeurs de référence de CO₂ à l'intérieur ont été publiées par la commission pour l'hygiène de l'air intérieur (IRK) du Bureau fédéral de l'environnement et par le bureau régional de la santé publique.²⁰

Un certain nombre de pays européens voisins ont publié des directives et des recommandations concernant la ventilation des bâtiments, y compris les écoles, qui contiennent entre autres aussi des règlements pour limiter la concentration de CO₂ dans l'air intérieur. En Finlande, la concentration de CO₂ maximale admissible dans l'air

intérieur s'élève à 1200 ppm pendant l'utilisation et dans des conditions météorologiques ordinaires. Les directives norvégiennes et suédoises prévoient une concentration de CO₂ maximale de 1000 ppm pour les pièces d'habitation, les écoles et les bureaux. Au Danemark, la concentration de dioxyde de carbone ne devrait pas dépasser 1000 ppm dans les écoles et maternelles et dans les bureaux selon la directive de l'autorité pour la sécurité au travail. Le renouvellement d'air est considéré comme insuffisant si la concentration de CO₂ dépasse temporairement la valeur de 2000 ppm plusieurs fois par jour.²¹

Aux postes de travail régis par les dispositions du règlement relatif aux substances dangereuses, une valeur limite de 5000 ppm de dioxyde de carbone s'applique aux postes de travail selon TRGS 900 (règles techniques concernant les substances dangereuses).

Technique de mesure du CO₂.

Vous disposez de trois possibilités pour mesurer et surveiller le dioxyde de carbone à l'intérieur :

Appareils de mesure du CO₂ (p.ex. testo 535) :



Ces appareils portatifs, qui conviennent aussi pour les mesures de longue durée, mesurent rapidement et précisément le taux de CO₂.

Enregistreurs de données pour le CO₂ (testo 160 IAQ) :



En plus du CO₂, ils mesurent aussi la température et l'humidité en continu. Les valeurs de mesure sont transférées au Cloud via WiFi ce qui permet l'émission d'alarmes par e-mail ou SMS en cas de violation des limites. Le feu tricolore de la qualité de l'air, bien visible, permet de plus aux responsables de voir d'un seul coup d'œil le niveau de qualité de l'air intérieur.

Analyseurs de climat multifonctions (p.ex. testo 440) :



En plus du CO₂, ils mesurent aussi tous les autres paramètres climatiques tels que l'écoulement, la température, l'humidité, le degré de turbulence, le CO ou la valeur lux.

Si vous vous intéressez aux appareils de mesure du CO₂ de Testo, consultez le site Web de Testo et contactez-nous : www.testo.com

Sources.

- ¹ Bundesgesundheitsbehörde, Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz des Umweltbundesamtes 2008, Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Springer Medizin Verlag Ergonomic Institut für Arbeits- und Sozialforschung, page 1358
- ² Müller-Limroth (1977) : cité dans Luftqualität in Innenräumen (1997). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 287, cité à Komfortlüftung.at gesund & energieeffizient, Physikalische Faktoren Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter, Aktualisierte Fassung August 2011, auteurs (Dipl.-Ing. Dr.Rolf Boos, Dipl.-Ing. Bernhard Damberger, Dipl.-Ing. Dr.Hans-Peter Hutter, Univ.-Prof. Dr. Michael Kundi, Dr.Hanns Moshhammer, Dipl.-Ing. Peter Tappler, Dipl.-Ing. Felix Twardik, Dr. Peter Wallner), <http://www.komfortlüftung.at/>
- ³ Bundesgesundheitsbehörde, Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz des Umweltbundesamtes 2008, Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Springer Medizin Verlag Ergonomic Institut für Arbeits- und Sozialforschung, page 1362
- ⁴ Komfortlüftung.at gesund & energieeffizient, Physikalische Faktoren Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter, Aktualisierte Fassung August 2011, page 6, auteurs (Dipl.-Ing. Dr.Rolf Boos, Dipl.-Ing. Bernhard Damberger, Dipl.-Ing. Dr.Hans-Peter Hutter, Univ.-Prof. Dr. Michael Kundi, Dr.Hanns Moshhammer, Dipl.-Ing. Peter Tappler, Dipl.-Ing. Felix Twardik, Dr. Peter Wallner), <http://www.komfortlüftung.at/>
- ⁵ ECA (1992) Guidelines for ventilation requirements in buildings. European Collaborative Action Indoor Air Quality & its Impact on Man. Report no. 11. EUR 14449, cité dans : Bundesgesundheitsbehörde, Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz des Umweltbundesamtes 2008, Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Springer Medizin Verlag Ergonomic Institut für Arbeits- und Sozialforschung, page 1366
- ⁶ Bundesgesundheitsbehörde, Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz des Umweltbundesamtes 2008, Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Springer Medizin Verlag Ergonomic Institut für Arbeits- und Sozialforschung, page 1358 et suiv.
- ⁷ ibid
- ⁸ <https://www.allum.de/stoffe-und-ausloeser/schadstoffe-der-innenraumluft/allgemeines-zur-innenraumluftqualitaet>
- ⁹ Umweltbundesamt Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden, Autoren Dr. Heinz-Jörn Moriske und Dr. Regine Szewzyk, 2008, page 32, http://raumluft.linux47.webhome.at/fileadmin/dokumente/uba_innenraumhygiene_schulgebäude.pdf
- ¹⁰ Fig. 3 :
Ad-hoc AG IRK/AOLG, 2008 : Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Bundesgesundheitsbl-Gesundheitsforsch-Gesundheitsschutz
- ¹¹ Über das Sick-Building Syndrome, auteur : Dr-Ing. Ahmet Cakir, Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 1994 (<http://ergonomic.de/wp-content/uploads/2015/03/sick-building-2002.pdf>)
- ¹² Umweltbundesamt Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden, auteurs : Dr. Heinz-Jörn Moriske et Dr. Regine Szewzyk, 2008, page 10
- ¹³ Fraunhofer IBP, Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Study Report Titel Impact of the indoor environment on learning in schools in Europe, auteurs : Gunnar Grün, Susanne Urlaub, Stuttgart, 10. Dezember 2015, https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Presseinformationen/Velux-Prestudy_WhitePaper_141205_amended.pdf
- ¹⁴ Shendell DG, Prill R, Fisk WJ, et al. (2004) Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. Indoor Air 14:333-341, cité dans : Bundesgesundheitsbehörde, Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz des Umweltbundesamtes 2008, Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Springer Medizin Verlag Ergonomic Institut für Arbeits- und Sozialforschung
- ¹⁵ Fraunhofer IBP, Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Study Report Titel Impact of the indoor environment on learning in schools in Europe, auteurs : Gunnar Grün, Susanne Urlaub, Stuttgart, 10. Dezember 2015, (https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Presseinformationen/Velux-Prestudy_WhitePaper_141205_amended.pdf)
- ¹⁶ Umweltbundesamt Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden, auteurs : Dr. Heinz-Jörn Moriske et Dr. Regine Szewzyk, 2008 (http://raumluft.linux47.webhome.at/fileadmin/dokumente/uba_innenraumhygiene_schulgebäude.pdf), page 7
- ¹⁷ Mensch-Umwelt-Gesundheit, Bericht CO₂: <http://raumluft.linux47.webhome.at/natuerliche-mechanische-lueftung/co2-als-lueftungsindikator/>, page 2
- ¹⁸ Rudnick SN, Milton DK (2003) Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. Indoor Air 13:237-245, cité dans Bundesgesundheitsbehörde, Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz des Umweltbundesamtes 2008, Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Springer Medizin Verlag Ergonomic Institut für Arbeits- und Sozialforschung, page 1365
- ¹⁹ Umweltbundesamt Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden, auteurs : Dr. Heinz-Jörn Moriske et Dr. Regine Szewzyk, 2008 (http://raumluft.linux47.webhome.at/fileadmin/dokumente/uba_innenraumhygiene_schulgebäude.pdf), page 39
- ²⁰ Bundesgesundheitsbehörde, Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz des Umweltbundesamtes 2008, page 1358- 1369, <http://www.komfortlüftung.at/gesund&energieeffizient,Komfortlüftungsinfo.No.4,GesetzlicheVorgabenundRegelwerke,Herausgegebenam15.10.2010>, page 7
- ²¹ SF-Ministry of the Environment (2003) Indoor climate and ventilation of buildings. Regulations and Guidelines 2003. D2 National building code of Finland, <http://www.environment.fi/default.asp?contentid=68171&lan=en>, cité dans : Bundesgesundheitsbehörde, Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz des Umweltbundesamtes 2008, Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Springer Medizin Verlag Ergonomic Institut für Arbeits- und Sozialforschung

DISTRAME SA

Parc du Grand Troyes - Quartier Europe Centrale
40 rue de Vienne - 10300 SAINTE-SAVINE

Tél. : 03 25 71 25 83 - Fax : 03 25 71 28 98
infos@distrame.fr - www.distrame.fr