



Air Infiltration and Ventilation Centre

Mise à l'abri dans les bâtiments en cas d'émissions toxiques importantes à l'extérieur

W.R. Chan, P.N. Price, A.J. Gadgil
Lawrence Berkeley National Laboratory, USA

1 Introduction

Une émission toxique atmosphérique à grande échelle, intentionnelle ou accidentelle (p.ex. une attaque terroriste ou un accident industriel), peut causer de grands préjudices aux riverains. Dans ces conditions, il peut être efficace, dans le cadre d'une stratégie d'intervention d'urgence, de se mettre à l'abri dans les bâtiments. On a documenté des exemples où l'abri sur place avait réussi à éviter des blessés et des victimes [1, 2]. Comme l'éducation du public et sa préparation sont essentielles pour assurer le succès d'une intervention d'urgence, de nombreux organismes ont rédigé des documents qui conseillent au public ce qu'il faut faire pendant et après la mise à l'abri [3, 4, 5]. Le présent document entend étudier le rôle joué par les bâtiments dans la protection qu'ils offrent à leurs occupants.

2 Quelle est l'efficacité de l'abri offert?

La nature soudaine d'une émission terroriste ou accidentelle implique que l'on manque souvent de temps pour évacuer les riverains dans un endroit sûr. Il reste une option: se mettre à l'abri jusqu'à ce que le nuage toxique se soit dissipé. L'avantage évident de rester à l'intérieur est que les bâtiments constituent un réservoir d'air propre. Même si les bâtiments ne sont pas étanches à l'air, leur enveloppe réduit le transport des polluants toxiques vers l'intérieur. De ce fait, la concentration intérieure augmentera beaucoup plus lentement

et restera relativement basse par rapport à la concentration extérieure.

2.1 Echange d'air entre l'extérieur et l'intérieur

Lorsque l'on se réfugie dans les bâtiments, il y a lieu de fermer portes et fenêtres et de mettre les ventilateurs de pulsion et d'extraction à l'arrêt afin de réduire au maximum l'échange d'air avec l'extérieur. En pareil cas, le nombre de renouvellements d'air par heure (ACH) est déterminé par les fuites d'air incontrôlées à travers l'enveloppe du bâtiment (*Figure 1*). L'infiltration d'air est fonction du défaut d'étanchéité du bâtiment et des pressions différentielles au travers de l'enveloppe, résultant des différences de température entre l'extérieur et l'intérieur et des forces exercées par le vent.



Figure 1: Fuite d'air incontrôlée, appelée infiltration d'air, à travers l'enveloppe d'une maison.¹

¹ Avec l'aimable autorisation de US EPA ENERGY STAR®.

Les taux d'infiltration d'air peuvent varier de moins de 0.1 ACH pour une maison étanche dans des conditions météorologiques tempérées à plus de 1.5 ACH pour une maison peu étanche dans des conditions météorologiques sévères (*Tableau 1*). Ces valeurs sont tirées de mesures des fuites d'air dans des maisons aux Etats-Unis [7]. Les maisons des pays à climat plus sévère, comme la Suède, la Norvège et le Canada, ont tendance à être plus étanches à l'air que les valeurs présentées ici [8].

S'agissant d'un contaminant bien conservé (c.-à-d. qui ne se dépose pas et ne réagit pas), la concentration intérieure durant la mise à l'abri peut être prédite sur base du taux d'infiltration d'air et des concentrations extérieures (*Figure 2*). Les maisons à taux élevés d'infiltration d'air (p.ex. 1 ACH) laisseront pénétrer de plus grandes quantités de substance toxique au moment où le nuage toxique arrivera. Cependant, étant donné l'échange rapide avec l'extérieur, la concentration intérieure diminuera également beaucoup plus vite par rapport aux maisons plus étanches, après le départ du nuage extérieur. Si l'on maintenait l'abri sur place dans toutes les maisons pendant un temps assez long, l'exposition intérieure (concentration intégrée dans le temps) approcherait en fin de compte le niveau extérieur, en supposant qu'il n'y ait eu aucune perte de substance toxique au moment de la pénétration dans le bâtiment et une fois à l'intérieur. C'est pourquoi la fin de l'abri sur place est un élément important de la stratégie globale de mise à l'abri pour minimiser l'exposition.

2.2 Mécanismes de piégeage

Les mécanismes par lesquels les substances toxiques sont piégées par les bâtiments réduisent encore la concentration intérieure en substance toxique. Les enveloppes des bâtiments peuvent piéger certains aérosols biologiques (dans la plage caractéristique de 1 à 5 μm) au moment où ceux-ci s'infiltrent par les fissures. On a découvert que le facteur de pénétration, défini comme la fraction du contaminant dans l'air d'infiltration qui traverse l'enveloppe du bâtiment, était proche de 1 pour les particules de 1 μm de diamètre [9].

Une étude expérimentale suggère également que les particules de plus de 5 μm auraient un facteur de pénétration nettement plus bas dans les maisons construites de manière plus étanche [10]. Les enveloppes des bâtiments peuvent donc offrir une certaine protection, mais peu importante, par rapport aux nuages extérieurs d'aérosols biologiques.

Une fois à l'intérieur des bâtiments, les aérosols biologiques peuvent se déposer sur les surfaces. Pour les particules de 1 à 5 μm , le taux de déperdition par déposition est équivalent à une amenée d'air neuf supplémentaire de 0.1 à 1 ACH [11]. La *Figure 3* montre les concentrations intérieures à différents taux de déperdition. A un taux de déperdition de 1 h^{-1} , la concentration intérieure tombe à moins de 1% de la concentration de pic extérieure plusieurs heures plus tôt que s'il n'y avait pas dépôt. Par ailleurs, un taux de déperdition de 0.1 h^{-1} a peu d'effet sur la concentration intérieure. La remise en suspension de particules – un processus qui ne sera pas étudié ici – peut réintroduire des particules déposées dans l'air et accroître ainsi leur concentration atmosphérique.

Tableau 1: Taux de fuite et d'infiltration d'air normalisés caractéristiques de bâtiments résidentiels américains, estimés à l'aide du modèle LBL Infiltration Model [6] dans différentes conditions météorologiques.

Conditions météo	Vitesse du vent [m/s]	ΔT [K] entre l'intérieur et l'extérieur	ΔP à travers l'enveloppe du bâtiment [Pa]	Infiltration d'air [ACH]		
				Maison étanche	Maison typique	Maison peu étanche
Tempérées	2	5	0.2	0.07	0.1	0.4
Modérées	5	15	1	0.2	0.3	1.0
Sévères	7	25	2	0.3	0.5	1.6

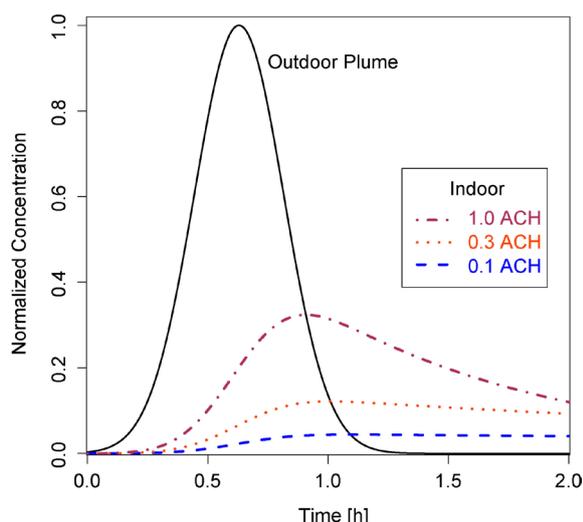


Figure 2: Profils de concentration intérieure dans un logement bien ventilé à différents taux d'échange d'air. Les concentrations illustrées sont normalisées par rapport à la concentration de pic extérieure.

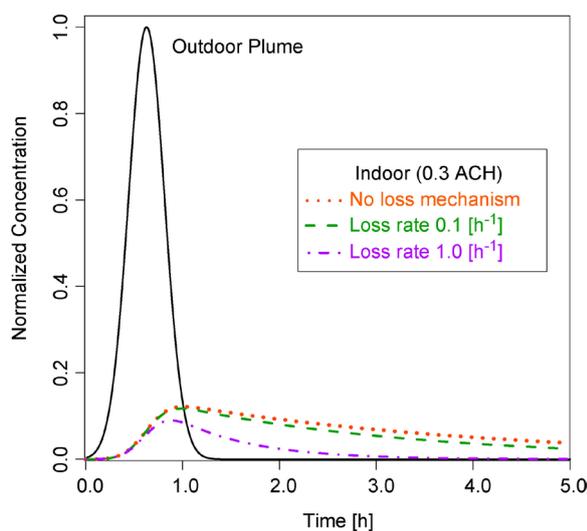


Figure 3: Profils de concentration intérieure pour une maison typique à différents taux de déperdition. Les concentrations illustrées sont normalisées par rapport à la concentration de pic extérieure.

Le facteur de pénétration des gaz dépend fortement de la probabilité de réaction polluant-surface, laquelle est définie comme le ratio du taux de piégeage et du taux de collision de l'espèce de gaz à la surface [12]. Cependant, la sorption des surfaces intérieures (qui peut comprendre l'adsorption, l'absorption, et la liaison chimique) est probablement le mécanisme d'élimination dominant pour les agents chimiques. Tout comme le dépôt de particules, le taux de déperdition par sorption

est, lui aussi, très sensible au niveau d'ameublement et aux autres conditions intérieures. Les produits chimiques sorbés peuvent aussi se désorber lentement des surfaces. Des expériences à l'échelle d'une pièce indiquent que le taux de déperdition par sorption de NH_3 , Cl_2 , SO_2 , sarin, et VX sont équivalents à une amenée d'air frais supplémentaire de 1 ACH [13, 14, 15], ce qui est nettement plus rapide que le taux de renouvellement d'air caractéristique de 0.3 h^{-1} .

2.3 Effets sur la santé

Les effets sur la santé de nombreux produits chimiques sont le mieux prédits par le "taux de charge toxique". Le taux de charge toxique est la concentration atmosphérique du produit chimique élevée à un exposant approprié. En présence d'un agent à exposant élevé (p.ex. le H_2S a un exposant de 4, certains agents nerveux ont un exposant de 2), l'exposition à une concentration élevée pendant un temps très court est pire que l'exposition à une concentration inférieure pendant une durée proportionnellement plus longue. Cette caractéristique de rapport dose-efficacité non linéaire veut dire qu'une mise à l'abri est très efficace pour prévenir les blessures et les décès car la concentration intérieure reste beaucoup plus basse que la concentration extérieure pendant l'émission (Figure 2). Une fois le nuage passé, la concentration intérieure retombe lentement, si bien que la concentration est plus élevée à l'intérieur qu'à l'extérieur. C'est pourquoi il y a lieu de terminer la mise à l'abri par l'ouverture des fenêtres et des portes afin d'éviter une exposition prolongée aux résidus restés à l'intérieur. Le moment optimal de l'arrêt dépendra des caractéristiques de l'émission ainsi que du degré de protection offerte par les bâtiments à l'égard de l'agent. En général, le moment de l'arrêt est le plus critique si l'on s'est mis à l'abri dans des bâtiments peu étanches à l'égard d'un dégagement très concentré d'un agent non sujet au dépôt ou à la sorption à l'intérieur.

3 Rôle des systèmes de ventilation

La plupart des immeubles commerciaux ont l'une ou l'autre forme de système de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC) comportant un filtre à air pour piéger les particules et, dans certains cas, un épurateur d'air pour piéger les gaz. Lorsqu'il s'agit d'aérosols biologiques de la plage de 1 à 5 μm , beaucoup de filtres à air ont un rendement de piégeage limité selon leur conception particulière et l'encrassement du filtre [16]. Les médias filtrants habituellement utilisés en épuration de l'air sont même moins efficaces contre la plupart des agents chimiques de guerre. Il faudrait des sorbants spéciaux, chimiquement actifs, pour réaliser un piégeage significatif. Le court-circuitage du filtre ou du sorbant est un autre problème qui risque de limiter le rendement du système. En outre, le fonctionnement du système de ventilation peut accroître l'échange d'air global avec l'extérieur, ce qui n'est pas souhaitable durant une mise à l'abri. Le conseil par défaut est donc d'arrêter le système de ventilation mécanique et les ventilateurs d'extraction des salles de bains en réponse à une émission extérieure [17]. Il y a également lieu de fermer totalement les registres d'admission et d'extraction.

Les immeubles commerciaux présentent une autre différence par rapport aux petits bâtiments résidentiels, en ce que l'air intérieur des premiers ne peut pas être considéré comme bien brassé dans tout l'immeuble. Par conséquent, les concentrations intérieures dans les différentes parties de l'immeuble dépendront aussi des flux d'air interzonaux [18] et ne seront pas uniformes dans tout l'immeuble (*Figure 4*). Lorsque le système HVAC fonctionne, le transport du contaminant à l'intérieur du bâtiment est déterminé par le flux d'air envoyé par les unités de traitement d'air et les systèmes de conduits. Habituellement, l'air est rapidement brassé à l'intérieur d'une zone, mais les zones sont conçues pour être isolées les unes des autres. Lorsque l'installation HVAC est arrêtée, la circulation générale de l'air et le brassage intrazonal sont fortement réduits. Pourtant, le contaminant peut finir par se répandre dans tout l'immeuble. En pareilles circonstances, les concentrations intérieures peuvent présenter de

fortes variations en fonction des conditions météorologiques et des voies de fuite d'air de l'immeuble.

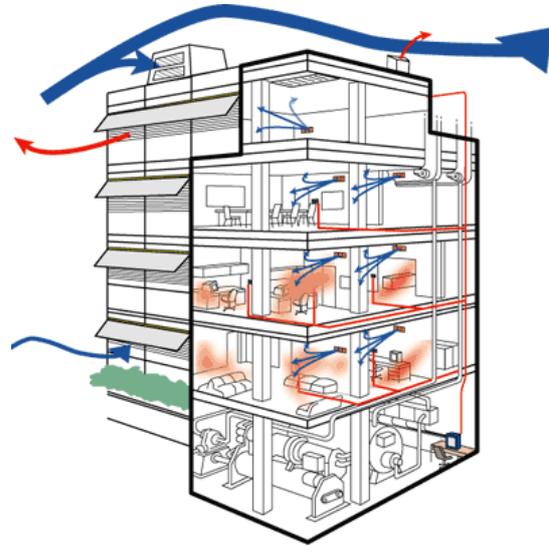


Figure 4: Les immeubles commerciaux peuvent avoir des voies de circulation d'air très complexes; les concentrations de contaminant peuvent rester non uniformes pendant longtemps.

4 Mesures proactives

A part fermer toutes les portes et les fenêtres, et arrêter les systèmes de ventilation, il y a moyen de prendre une série de mesures pour que les bâtiments protègent mieux contre les émissions extérieures (*Figure 5*). Un simple ruban autocollant sur le pourtour des portes et les orifices de ventilation, et une feuille de plastique sur les fenêtres peuvent réduire l'infiltration d'air dans une certaine mesure [19], en particulier lorsqu'on choisit une pièce intérieure (c.-à-d. une pièce sans relation directe avec l'extérieur) pour s'abriter. Des modifications plus permanentes peuvent comprendre des techniques d'étanchéification telles que le calfeutrage des logements [20]. Dans les immeubles plus grands et plus vulnérables on pourrait installer un système de filtration afin de fournir de l'air neuf à une pression positive capable d'empêcher l'air contaminé de s'infiltrer. La filtration active peut aussi prendre la forme d'une unité d'épuration d'air indépendante contenant des filtres HEPA et des filtres à charbon actif [21, 22].



Figure 5: Exemples de mesures proactives: étanchéification (bande autocollante – plastique) et épurateur d'air.²

² Avec l'aimable autorisation de Sedgwick County Emergency Management (en haut), Big Five's Weatherization Program (au centre), et Morrow County Oregon Emergency Management Office (en bas).

5 Discussion

Bien que l'idée de chercher un abri sur place s'impose à l'évidence, encore faut-il caractériser les bénéfices d'une mise à l'abri dans des scénarios réalistes. La grande diversité des caractéristiques des bâtiments a pour corollaire une plage d'efficacité dans l'abri sur place. Il a aussi des incertitudes considérables dues à la compréhension limitée de certains mécanismes de transport intérieur et de la destinée des substances toxiques en suspension dans l'air. Malgré tout, les expériences du passé et des études préliminaires indiquent l'abri sur place comme une stratégie prometteuse pour l'intervention d'urgence.

La *Figure 6* illustre une simulation de la réduction des dommages escomptée de la mise à l'abri d'un quartier d'Albuquerque pour le protéger d'une émission hypothétique de chlore gazeux de grande ampleur [23]. L'estimation des taux d'infiltration d'air des maisons se base sur les caractéristiques de fuite d'air et les conditions météorologiques pendant l'émission. Le modèle comprend aussi une estimation de la sorption sur les surfaces intérieures. A la fin des quatre heures que dure l'émission, la zone à risque d'effets mortels est de moindre ampleur si les gens ont cherché refuge à l'intérieur pendant la durée de l'émission que si tout le monde était resté dehors. La mise à l'abri peut même être plus efficace qu'on le voit ici pour des émissions de plus courte durée, et si l'on a déployé des mesures et une stratégie proactives appropriées.

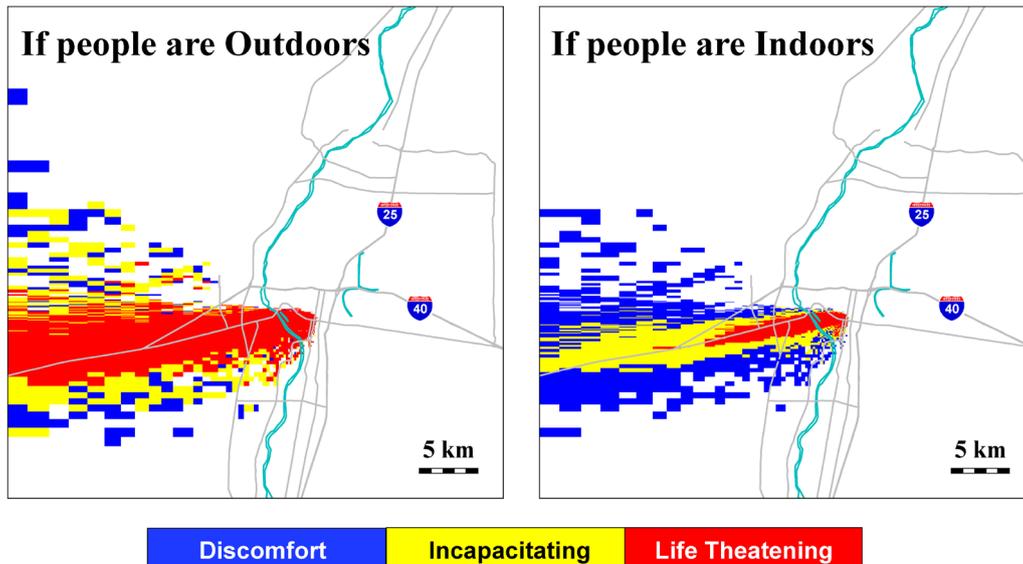


Figure 6: Prédiction des effets sur la santé, basée sur les Directives relatives aux expositions aiguës de l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA) [24], d'une émission hypothétique de chlore gazeux de quatre heures à Albuquerque si l'on pratique l'abri sur place (à droite) et si tout le monde est dehors (à gauche).

6 Conclusion

Dans la plupart des cas, l'abri sur place constitue une intervention efficace pour se prémunir d'émissions extérieures de grande ampleur. C'est particulièrement vrai pour une émission de courte durée (quelques heures ou moins) et pour les produits chimiques qui affichent des caractéristiques non linéaires de rapport dose-efficacité.

Non seulement l'enveloppe du bâtiment réduit l'échange d'air extérieur-intérieur, mais elle peut aussi filtrer certains agents biologiques voire chimiques. Une fois à l'intérieur, les substances toxiques peuvent se déposer ou se sorber sur les surfaces intérieures. Tous ces processus contribuent à l'efficacité de l'abri sur place.

L'étanchéification de l'enveloppe des bâtiments et une amélioration de la filtration peuvent améliorer la protection offerte. Toutefois, il y a lieu d'arrêter les systèmes de ventilation mécanique habituellement présents dans la plupart des immeubles commerciaux et de fermer les registres lorsqu'on se met à l'abri d'une émission extérieure.

Une fois le nuage extérieur passé, une certaine contamination résiduelle restera à l'intérieur. Il est donc important de mettre fin à l'abri sur place après le passage du nuage toxique afin de limiter l'exposition à la substance toxique.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Remi Carrie, Buvana Jayaraman, David Lorenzetti et Peter Wouters pour leurs commentaires.

Ce travail a bénéficié du soutien du Science and Technology Directorate of the Department of Homeland Security et a été réalisé dans le cadre du contrat n° DE-AC03-76SF00098 avec le Ministère Américain de l'Energie

7 Références

- [1] “Sheltering in Place as a Public Protective Action”, National Institute for Chemical Studies, 2001:
<http://www.nicsinfo.org/shelter%20in%20place.pdf>
- [2] Mannan MS, Kilpatrick DL, “The Pros and Cons of Shelter-in-Place”, Process Safety Progress, Vol. 19 (4), p. 210, 2000.
- [3] Shelter-in-Place Information Center, National Institute for Chemical Studies:
<http://www.nicsinfo.org/SIP%20Center.htm>
- [4] American Red Cross:
<http://www.redcross.org/services/disaster/beprepared/shelterinplace.html>
- [5] Emergency Management Center, Oak Ridge National Laboratory:
<http://emc.ornl.gov/index.html>
- [6] Sherman MH, “Air Infiltration in Buildings”, PhD Thesis, University of California Berkeley, CA, 1980.
- [7] Chan WR, Price PN, Sohn MD, Gadgil AJ, “Analysis of US Residential Air Leakage Database”, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-53367, 2003:
<http://eetd.lbl.gov/ied/apt/pubs/Leakage.pdf>
- [8] Sherman MH, Chan WR, “Building Airtightness: Research and Practice”, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-53356, 2003:
<http://epb1.lbl.gov/EPB/Publications/lbnl-53356.pdf>
- [9] Liu DL, Nazaroff WW, “Particle Penetration Through Building Cracks”, Aerosol Science and Technology, Vol. 37, p. 565-573, 2003.
- [10] Thatcher TL, Lunden MM, Revzan KL, Sextro RG, Brown NJ, “A Concentration Rebound Method for Measuring Particle Penetration and Deposition in the Indoor Environment”, Aerosol Science and Technology, Vol. 37, p.847-864, 2003.
- [11] Thatcher TL, McKone TE, Fisk WJ, Sohn MD, Delp WW, Riley WJ, Sextro RG, “Factors Affecting the Concentration of Outdoor Particles Indoors (COPI): Identification of Data Needs and Existing Data”, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-49321, 2001.
- [12] Liu DL, Nazaroff WW, “Modeling Pollutant Penetration across Building Envelopes”, Atmospheric Environment, Vol. 35, p.4451-4462, 2001.
- [13] Singer BC, Destailats H, Hodgson AT, Revzan KL, Sextro RG, “Indoor Sorption of Surrogates for Sarin and Related Chemical Warfare Agents”, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-54992, 2004.
- [14] Karlson E, Huber U, “Influence of Deposition on the Indoor Concentration of Toxic Gases”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 49, p. 15-27, 1996.
- [15] Grøntoft T, Raychaudhuri MR, “Compilation of Tables of Surface Deposition Velocities for O₃, NO₂ and SO₂ to a Range of Indoor Surfaces”, Atmospheric Environment, Vol. 38, p. 533-544, 2004.
- [16] “Guidance for Filtration and Air-Cleaning Systems to Protect Building Environments”, Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 2003:
<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-136/pdfs/2003-136.pdf>
- [17] Advice for Safeguarding Buildings Against Chemical or Biological Attack, Indoor Environment Department, Lawrence Berkeley National Laboratory:
<http://securebuildings.lbl.gov/>
- [18] Multizone Simulation, Airflow and Pollutant Transport Group, Indoor Environment Department, Lawrence Berkeley National Laboratory:
http://eetd.lbl.gov/ied/apt/APT_tms.html

- [19] Sorensen JH, Vogt BM, "Will Duct Tape and Plastic Really Work? Issues Related to Expedient Shelter-in-Place", Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2001/154, 2001:
http://emc.ornl.gov/EMCWeb/EMC/PDF/TM_2001_154_duct_plastic.pdf
- [20] Weatherization Assistance Program, Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy:
<http://www.eere.energy.gov/weatherization/>
- [21] Blewett WK, Arca VJ, "Experiments in Sheltering in Place: How Filtering Affects Protection Against Sarin and Mustard Vapor", Edgewood Chemical Biological Center, Aberdeen Proving Ground, 1999.
- [22] National Institute for Chemical Studies News, Vol. 12, 2003:
<http://www.nicsinfo.org/mn0203.pdf>
- [23] Chan WR, Price PN, Gadgil AJ, Nazaroff WW, Loosmore G, Sugiyama G, "Modeling sheltering-in-place including sorption on indoor surfaces", American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, 2004:
<http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/73459.pdf>
- [24] US EPA, Office of Pollution Prevention & Toxics, Acute Exposure Guideline Levels (AEGs):
<http://www.epa.gov/oppt/aegl/chemlist.htm>

Les articles suivants ont déjà été publiés dans cette série:

L'Air Infiltration and Ventilation Centre a été inauguré par l'Agence Internationale de l'Energie et est financé par les sept pays suivants: Belgique, Etats-Unis d'Amérique, France, Grèce, Norvège, Pays-Bas et République tchèque.

L'Air Infiltration and Ventilation Centre apporte son soutien technique à la recherche théorique et appliquée sur l'infiltration d'air et la ventilation. Il ambitionne de promouvoir la compréhension de la complexité de la circulation de l'air dans les bâtiments. Il entend également faire progresser l'application efficace de mesures d'économie d'énergie dès la conception des nouveaux bâtiments et l'amélioration du parc immobilier existant.