



Ventilation naturelle et lutte contre les infections en milieu de soins

James Atkinson, Yves Chartier, Carmen Lúcia Pessoa-Silva, Paul Jensen, Yuguo Li, Wing-Hong Seto

Ventilation naturelle pour lutter contre les infections en milieu de soins

Éditeurs :

**James Atkinson, Yves Chartier,
Carmen Lúcia Pessoa-Silva,
Paul Jensen, Yuguo Li
et Wing-Hong Seto**

Catalogage à la source : Bibliothèque de l'OMS

Utilisation de la ventilation naturelle pour lutter contre les infections en milieu de soins.

1.Ventilation - méthodes. 2.Microbiologie air. 3.Lutte contre infection. 4.Equipement santé - normes.
5. Ligne directrice. I.Organisation mondiale de la Santé.

ISBN 978 92 4 254785 6

(NLM classification: WX 167)

© Organisation mondiale de la Santé 2010

Tous droits réservés. Il est possible de se procurer les publications de l'Organisation mondiale de la Santé auprès des Editions de l'OMS, Organisation mondiale de la Santé, 20 avenue Appia, 1211 Genève 27 (Suisse) (téléphone : +41 22 791 3264 ; télécopie : +41 22 791 4857 ; adresse électronique : bookorders@who.int). Les demandes relatives à la permission de reproduire ou de traduire des publications de l'OMS – que ce soit pour la vente ou une diffusion non commerciale – doivent être envoyées aux Editions de l'OMS, à l'adresse ci-dessus (télécopie : +41 22 791 4806 ; adresse électronique : permissions@who.int).

Les appellations employées dans la présente publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation mondiale de la Santé aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. Les lignes en pointillé sur les cartes représentent des frontières approximatives dont le tracé peut ne pas avoir fait l'objet d'un accord définitif.

La mention de firmes et de produits commerciaux ne signifie pas que ces firmes et ces produits commerciaux sont agréés ou recommandés par l'Organisation mondiale de la Santé, de préférence à d'autres de nature analogue. Sauf erreur ou omission, une majuscule initiale indique qu'il s'agit d'un nom déposé.

L'Organisation mondiale de la Santé a pris toutes les précautions raisonnables pour vérifier les informations contenues dans la présente publication. Toutefois, le matériel publié est diffusé sans aucune garantie, expresse ou implicite. La responsabilité de l'interprétation et de l'utilisation dudit matériel incombe au lecteur. En aucun cas, l'Organisation mondiale de la Santé ne saurait être tenue responsable des préjudices subis du fait de son utilisation.

Les auteurs cités sont seuls responsables des points de vue exprimés dans cette publication.

Les photographies de couverture représentent des établissements de soins situés (de haut en bas) au Myanmar, en Afrique du Sud, au Pérou, au Népal, dans la RAS de Hong Kong et au Népal.

Conception de la couverture : Design ONE, Canberra, Australie

Réalisation et conception : Biotext, Canberra

Table des matières

Avant-propos	ix
Remerciements	xi
Contributeurs	xiii
Conflits d'intérêts	xvii
Résumé d'orientation	xix
Abréviations et définitions	xxiii
1 Principes généraux de lutte contre l'infection	3
1.1 La notion de précaution d'isolement et son évolution dans le temps	3
1.2 Pratiques d'isolement dans la lutte contre l'infection	4
1.3 Pratiques d'isolement dans le cas des infections à transmission aérienne.....	4
1.4 Lutte contre l'infection lors des procédures à haut risque	6
1.5 Résumé	7
2 Concepts et types de ventilation	9
2.1 La ventilation.....	9
2.1.1 La ventilation naturelle	9
2.1.2 La ventilation mécanique	9
2.1.3 La ventilation hybride ou mixte	10
2.2 Évaluation des performances de la ventilation	10
2.3 Comparaison de la ventilation mécanique et de la ventilation naturelle	11
2.3.1 La ventilation mécanique	11
2.3.2 La ventilation naturelle	12
2.4 Ventilation mécanique ou ventilation naturelle dans la lutte contre l'infection.....	15

2.5	Résumé	17
3	Infection et ventilation	19
3.1	Relations entre ventilation et infection	19
3.2	Exigences de ventilation applicables pour la lutte contre les infections à transmission aérienne.....	21
3.3	Recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé relatives aux exigences en matière de ventilation .	23
3.3.1	Explication des recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé	24
3.3.2	Révision et évaluation des recommandations ...	25
3.4	Résumé	26
4	Comprendre la ventilation naturelle	28
4.1	Les forces motrices de la ventilation naturelle	28
4.1.1	La pression du vent	28
4.1.2	Le tirage	30
4.2	Débit de ventilation.....	31
4.3	Résumé	32
5	Conception et exploitation.....	33
5.1	Modes de ventilation naturelle et de ventilation hybride	33
5.1.1	Systèmes de ventilation naturelle.....	33
5.1.2	Systèmes de ventilation hybride (mixte).....	33
5.2	Principes généraux de conception de la ventilation naturelle	34
5.3	Considérations climatiques et autres facteurs intervenant dans la conception de la ventilation	35
5.3.1	Confort thermique	36
5.3.2	Contraintes liées aux fortes chaleurs.....	36
5.3.3	Contraintes liées au froid	38
5.3.4	Maintien de la qualité sanitaire de l'air intérieur	38
5.3.5	Gestion des problèmes de pollution atmosphérique	38
5.3.6	Bruit extérieur	39
5.3.7	Choix de matériaux de construction peu polluants.....	39
5.3.8	Humidité et développement de moisissures	39

5.3.9	Sécurité et propagation de maladies à transmission vectorielle.....	39
5.3.10	Bâtiments de grande hauteur.....	40
5.3.11	Sécurité incendie.....	40
5.4	Démarche de conception des systèmes de ventilation naturelle et de ventilation hybride.....	40
5.4.1	Dimensionnement des orifices de ventilation ...	41
5.4.2	Trois éléments majeurs dans la conception de la ventilation naturelle.....	42
5.5	Types de systèmes de ventilation naturelle.....	45
5.5.1	Couloir latéral.....	46
5.5.2	Couloir central.....	47
5.5.3	Cour.....	47
5.5.4	Tour à vent.....	49
5.5.5	Atrium, cheminée.....	50
5.5.6	Ventilation hybride (mixte).....	51
5.6	Applicabilité des systèmes de ventilation naturelle.....	52
5.7	Mise en service, exploitation et maintenance.....	53
5.7.1	Mise en service.....	53
5.7.2	Exploitation et maintenance.....	54
5.8	Résumé.....	55

Références	57
Annexe A	Articles inclus dans la revue systématique sur les relations entre ventilation et infection	65
Annexe B	Classement des recommandations par la méthode GRADE... 71	
Annexe C	Gouttelettes respiratoires	77
Annexe D	La notion de débit de ventilation	83
Annexe E	Démarche de détermination des exigences en matière de débit minimal de ventilation	87
Annexe F	Ventilation naturelle, exemple I : hôpital Nacional Dos de Mayo, Lima, Pérou	89
Annexe G	Ventilation naturelle, exemple II : hôpital Grantham, RAS de Hong Kong, Chine.....	95
Annexe H	Ventilation naturelle, exemple III : Unité de lutte contre la tuberculose, hôpital Tan Tock Seng, Singapour	101
Annexe I	Ventilation naturelle, exemple IV : Centre d'isolement de Damak, Népal.....	105

Tableaux

Tableau 2.1	Principaux avantages et inconvénients des différents types de systèmes de ventilation en milieu hospitalier	14
Tableau 3.1	Champ et définition des trois modes de transmission retenus pour la revue systématique.....	20
Tableau 4.1	Taux et débit de ventilation estimés pour une salle de 7 m × 6 m × 3 m	31
Tableau 5.1	Applicabilité potentielle des systèmes de ventilation naturelle en conditions idéales (consensus résultant d'une revue systématique de l'OMS)	52
Tableau E.1	Baisse de la concentration de noyaux de condensation dans une chambre d'isolement en fonction du taux de ventilation et de la durée.....	87
Tableau E.2	Risque d'infection pour une exposition de 15 minutes selon le taux de ventilation et la génération de quanta lorsqu'un	

	sujet infectant pénètre dans un espace clos de 6 m × 6,7 m × 2,7 m	88
Tableau F.1	Caractéristiques de la salle et renouvellements d'air mesurés par heure	90
Tableau G.1	Taux de ventilation mesurés dans les chambres pour patients tuberculeux	98

Figures

Figure 4.1	Direction des flux d'air induits par le vent dans un bâtiment	28
Figure 4.2	Ventilation unilatérale générée par les fluctuations de pression.....	29
Figure 5.1	Différents systèmes de ventilation naturelle et hybride.....	34
Figure 5.2	Une conception semi-ouverte laissant place au rayonnement thermique terrestre de grande longueur d'onde peut améliorer notamment le confort thermique en été	37
Figure 5.3	Règles empiriques relatives à la profondeur des chambres pour trois stratégies de ventilation différentes.....	45
Figure 5.4	Ventilation due au vent dans un hôpital à couloir latéral où l'air pénètre par les chambres.....	46
Figure 5.5	Ventilation naturelle due au vent dans un hôpital à couloir latéral où l'air pénètre par le couloir.....	47
Figure 5.6	Ventilation naturelle combinant la force du vent et le tirage dans un hôpital avec cour et couloir intérieur.....	48
Figure 5.7	Ventilation naturelle combinant la force du vent et le tirage dans un hôpital avec cour et couloir extérieur	48
Figure 5.8	Conception d'une tour à vent.....	49
Figure 5.9	Ventilation naturelle due au vent dans un hôpital équipé d'une tour à vent.....	50
Figure 5.10	Ventilation naturelle due au tirage (créé notamment par une cheminée solaire) dans un hôpital à cheminée solaire.....	51
Figure C.1	(A) Image strioscopique (visualisation utilisant la réfraction de la lumière due aux différences de densité de l'air) de la toux humaine, et (B) prise de vue d'un éternuement à la lampe à éclairs	78
Figure C.2	Courbe d'évaporation et de chute des gouttelettes établie par Wells.....	80
Figure C.3	Schémas d'échanges d'air liés aux gestes quotidiens	81
Figure F.1	Hôpital Nacional Dos de Mayo	89

Figure F.2	Plan et photos de différentes salles/chambres de l'hôpital Nacional Dos de Mayo	91
Figure F.3	Amélioration de la ventilation naturelle dans la salle d'attente des consultations externes à l'hôpital Nacional Dos de Mayo	93
Figure F.4	Plan de la salle d'attente et des salles de consultation	93
Figure G.1	Chambres et fenêtres ouvertes dans le service des tuberculeux de l'hôpital Grantham	95
Figure G.2	Ventilateur de plafond en été, radiateur en hiver.....	96
Figure G.3	Température ambiante, vitesse et direction du vent relevées par l'observatoire de Hong Kong (station météorologique de Wong Chuk Hang, proche de l'hôpital Grantham).....	99
Figure H.1	Deux vues du service d'hospitalisation des patients tuberculeux ; le périmètre du bâtiment à un seul niveau est dégagé pour permettre une ventilation naturelle tout au long de l'année	101
Figure H.2	Plan du service d'hospitalisation des patients tuberculeux..	102
Figure H.3	Salle d'hospitalisation des patients tuberculeux : vues de l'intérieur	103
Figure I.1	Le centre de rétention de l'OIM à Damak	105
Figure I.2	Unité d'isolement individuelle (à gauche) et espace libre entre le haut du mur et le toit pour permettre la ventilation naturelle (à droite)	106

Avant-propos

En juin 2007, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a publié des recommandations de prévention et de lutte contre l'infection sous le titre *Prévenir et combattre les maladies respiratoires aiguës à tendance épidémique ou pandémique dans le cadre des soins — Recommandations provisoires de l'OMS* (OMS, 2007). Pour la première fois dans ce document, la ventilation naturelle est envisagée comme l'une des mesures efficaces de lutte contre l'infection en milieu de soins. La formulation d'une telle recommandation par l'OMS montre que le rôle de la ventilation et de la ventilation naturelle est de plus en plus largement reconnu dans le domaine de la lutte contre l'infection.

Il ressortait de la publication de 2007 que des études complémentaires étaient nécessaires dans des domaines tels que les exigences minimales applicables à la ventilation naturelle, ainsi que la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance des systèmes de ventilation naturelle, pour qu'ils puissent être utilisés efficacement dans la lutte contre l'infection.

Ces deux dernières années, une équipe pluridisciplinaire d'ingénieurs, d'architectes, de spécialistes de la lutte contre les infections et de microbiologistes a travaillé à la réalisation du présent guide, pour donner aux concepteurs, ingénieurs et architectes des hôpitaux et aux personnels chargés de la lutte contre les infections en milieu hospitalier un guide de conception et d'exploitation. Les recommandations de ce guide OMS s'appuient sur une revue systématique de la littérature consacrée aux relations entre ventilation et transmission des affections, ainsi qu'aux solutions de ventilation naturelle efficaces pour lutter contre les infections.

Ce guide OMS doit être utilisé conjointement à d'autres documents de référence en matière de lutte contre les infections.

Il existe très peu d'études sur l'utilisation de la ventilation naturelle dans la lutte contre les infections à l'hôpital. Les auteurs du présent guide ont tenté de faire le point des connaissances actuelles. Tous commentaires des utilisateurs et des lecteurs seront mis à profit lors des révisions de ce guide ; pour plus d'informations, consulter les pages <http://www.who.int/csr/natvent> (suivre les liens « natvent »), ou <http://www.who.int/csr/bioriskreduction/natvent/en/>.

Dr Maria Neira
Directrice
Département Santé publique et
environnement
Sécurité sanitaire et environnement
Organisation mondiale de la Santé

Dr Michael Ryan
Directeur
Département Alerte et action au niveau
mondial
Sécurité sanitaire et environnement
Organisation mondiale de la Santé

Remerciements

Nous tenons à remercier le ministère français de la Santé, de la jeunesse et des sports, dont la collaboration et le généreux soutien financier ont permis la conception et la réalisation de ce guide.

Nous remercions également l'Agence des États-Unis pour le développement international (United States Agency for International Development), pour sa contribution financière à la conception et à la publication de ce document.

Nos remerciements s'adressent aussi au Fonds pour la lutte contre les maladies infectieuses du Conseil de subvention de la recherche (Research Grants Council Fund for the Control of Infectious Diseases) et à l'Administration des hôpitaux de la RAS de Hong Kong (Hospital Authority of Hong Kong SAR), qui ont financé des travaux de recherche et des mesurages sur le terrain en vue de l'élaboration de ce guide.

Nous remercions également la Société de lutte contre les infections de la région Asie - Pacifique (Asia Pacific Society of Infection Control) pour son soutien à la première réunion de consensus multidisciplinaire sur l'utilisation de la ventilation naturelle dans la lutte contre l'infection, qui s'est tenue du 15 au 17 mai 2007.

Enfin, nous remercions pour leur soutien et leur contribution le personnel et la direction des structures de soins présentées à titre d'exemples dans ce guide.

Contributeurs

Groupe de conception technique du guide

Rédacteurs

OMS

James ATKINSON

Yves CHARTIER

Carmem Lúcia PESSOA-SILVA

Externes

Paul JENSEN, Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, Georgie, États-Unis

Yuguo LI, The University of Hong Kong, RAS de Hong Kong

Wing-Hong SETO, Queen Mary Hospital, RAS de Hong Kong

Auteurs

OMS

James ATKINSON

Yves CHARTIER

Fernando OTAIZA

Carmem Lúcia PESSOA-SILVA

Externes

Pat CHING, Queen Mary Hospital, RAS de Hong Kong

Derek CROOME, University of Reading, Royaume-Uni

Rod ESCOMBE, Imperial College, London, Royaume-Uni

Yuguo LI, The University of Hong Kong, RAS de Hong Kong (auteur principal)

Li LIU, The University of Hong Kong, RAS de Hong Kong

Zhiwen LUO, The University of Hong Kong, RAS de Hong Kong

Jianlei NIU, The Hong Kong Polytechnic University, RAS de Hong Kong

Marco PERINO, Politecnico di Torino, Italie

Hua QIAN, Southeast University, Chine

Matthew SALT, Salt.arq Architects, Porto, Portugal

Takao SAWACHI, National Institute for Land and Infrastructure Management, Japon

WH SETO, Queen Mary Hospital, RAS de Hong Kong

Julian Wei-Tze TANG, National University Hospital, Singapour

Xiaojian XIE, Nanjing Normal University, Chine

Groupe OMS de pilotage du guide

Présidence

Yves CHARTIER

Carmem Lúcia PESSOA-SILVA

Membres

Jamie BARTRAM

Yves CHARTIER

Andrei ISSAKOV

Carmem Lúcia PESSOA-SILVA

Rose PRAY

Cathy ROTH

Fabio SCANO

Susan WILBURN

Comité externe de pilotage du guide

Michael GARDAM, Ontario Agency for Health Protection and Promotion et University of Toronto, Canada

Paul JENSEN, Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, Georgie, États-Unis

Hal LEVIN, Building Ecology Research Group, Santa Cruz, Californie, États-Unis

Jan SUNDELL, University of Texas at Tyler, États-Unis

Équipe chargée de la revue systématique

Externe

James AXLEY, Yale University, Connecticut, États-Unis
Christopher Yh CHAO, Hong Kong University of Science and Technology, RAS de Hong Kong
Benjamin COWLING, The University of Hong Kong, RAS de Hong Kong
Michael GARDAM, Ontario Agency for Health Protection and Promotion and University of Toronto, Canada
Michael HODGSON, Veterans Health Administration, États-Unis
Paul JENSEN, Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, Georgia, États-Unis
Stephen LAU, The University of Hong Kong, RAS de Hong Kong
Michael LEUNG, The University of Hong Kong, RAS de Hong Kong
Hal LEVIN, Building Ecology Research Group, Santa Cruz, California, États-Unis
Yuguo LI, The University of Hong Kong, Hong Kong SAR (investigateur principal)
Chun-Ho LIU, The University of Hong Kong, RAS de Hong Kong
Arsen MELIKOV, Technical University of Denmark, Danemark
Peter V NIELSEN, Aalborg University, Danemark
Steven RILEY, University of Hong Kong, RAS de Hong Kong
Mats SANDBERG, KTH Research School, Suède
Wing-Hong SETO, Queen Mary Hospital, RAS de Hong Kong
Adrian SLEIGH, Australian National University, Australie
Jan SUNDELL, University of Texas at Tyler, États-Unis
Ignatius TS YU, Chinese University of Hong Kong, RAS de Hong Kong (investigateur principal)
Shelly Lap Ah TSE, Chinese University of Hong Kong, RAS de Hong Kong
Kwok WAI THAM, National University of Singapore, Singapour

OMS

James ATKINSON

Yves CHARTIER

Andrei ISSAKOV

Fernando OTAIZA

Carmem Lúcia PESSOA-SILVA

Fabio SCANO

Nahoko (Nikki) SHINDO

Susan WILBURN

Conflits d'intérêts

Tous les auteurs ayant contribué à ce document et les membres des tableaux d'experts externe et interne ayant participé à la revue ont signé des déclarations de conflits d'intérêts. Aucun conflit d'intérêts n'a été déclaré.

Résumé d'orientation

En juin 2007, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a publié des recommandations sous le titre *Prévenir et combattre les maladies respiratoires aiguës à tendance épidémique ou pandémique dans le cadre des soins — Recommandations provisoires de l'OMS* (OMS, 2007). Pour la première fois dans ces recommandations, la ventilation naturelle est envisagée comme l'une des mesures environnementales efficaces pour réduire le risque de propagation d'infections en milieu de soins.

Le présent guide répond à un double objectif :

- promouvoir le recours à la ventilation naturelle dans le cadre de la lutte contre l'infection en milieu de soins (1^{re} partie) ; et
- décrire les principes fondamentaux de conception, de construction, d'exploitation et de maintenance d'un système de ventilation naturelle efficace pour la lutte contre l'infection (2^e partie).

Le présent guide s'adresse avant tout aux ingénieurs et aux architectes chargés de la conception ou de la gestion des établissements de soins. Il s'adresse en outre aux soignants, en particulier aux spécialistes de la lutte contre l'infection, travaillant dans les établissements de soins. L'accent est mis sur l'importance d'une coopération de ces différents acteurs — concepteurs, gestionnaires et personnels soignants des établissements hospitaliers — pour lutter efficacement contre les infections.

Ce guide s'applique aux maladies transmissibles par de fines gouttelettes ou par des noyaux de condensation. Il indique comment une chambre de précautions aériennes et les zones voisines peuvent être conçues pour que la ventilation naturelle permette de lutter contre l'infection. Cependant, il ne traite pas en détail des autres mesures de prévention des infections et de lutte contre l'infection.

L'élaboration de ce guide a comporté les étapes suivantes :

- réunion de consensus multidisciplinaire de deux jours sur le domaine d'utilisation et les principaux éléments de la ventilation naturelle dans le cadre de la lutte contre l'infection (mai 2007) ;
- revue systématique de la littérature traitant des relations entre ventilation et infection, et des techniques de ventilation naturelle (mars-décembre 2008) (voir l'annexe A pour plus de précisions) ;
- revue et définition des principaux éléments des recommandations par un tableau d'experts externe à l'OMS (novembre-décembre 2008) ; et
- revue par des pairs internes et externes à l'OMS (janvier-mai 2009).

L'encadré ci-après reprend les principales recommandations.

Principales recommandations

1. Pour contribuer à prévenir les infections à transmission aérienne, une ventilation adéquate est nécessaire dans toutes les zones de soins des établissements de soins.

Classement global : recommandation stricte

2. Pour la ventilation naturelle, les débits de ventilation minimaux suivants doivent être assurés, en valeur moyenne sur une heure :

- 160 l/s/patient (débit de ventilation moyen sur une heure) pour les chambres de précautions aériennes (avec un minimum de 80 l/s/patient) (attention : cette exigence ne s'applique qu'aux installations neuves ou aux rénovations de grande ampleur) ;
- 60 l/s/patient pour les chambres à usage général et les services de consultation externe ;
- 2,5 l/s/m³ pour les couloirs et autres lieux de passages ne comportant pas un nombre prédéterminé de patients ; toutefois, si des soins doivent être prodigués dans des couloirs, en situation d'urgence par exemple, les débits de ventilation doivent être les mêmes que ceux exigés pour les chambres de précautions aériennes ou les chambres à usage général.

La conception doit tenir compte des variations du débit de ventilation.

Lorsque la ventilation naturelle ne permet pas seule de satisfaire aux exigences de ventilation, il faut envisager d'autres systèmes de ventilation, comme les systèmes de ventilation naturelle hybride (mixte) et, si cela ne suffit pas, avoir recours à la ventilation mécanique.

Classement global : recommandation conditionnelle

3. Lors de la conception d'établissements de soins ventilés naturellement, il faut veiller à ce que le flux d'air général amène l'air des sources d'agents vers des zones où la dilution est suffisante, et de préférence vers l'extérieur.

Classement global : recommandation conditionnelle

4. Dans les espaces où sont réalisées des procédures générant des aérosols associées à la transmission d'agents pathogènes, les exigences relatives à la ventilation naturelle doivent correspondre au minimum à la recommandation 2. S'il s'agit d'agents aéroportés, les recommandations 2 et 3 doivent être appliquées.

Classement global : recommandation conditionnelle

Ces quatre recommandations ont été élaborées par le tableau d'experts externe chargé de la revue systématique, qui a utilisé la méthode d'évaluation GRADE lors de la réunion du tableau à Genève en novembre 2008 (voir l'annexe B). Dans les zones d'endémie de maladies vectorielles (dengue, malaria, par exemple), l'utilisation de la ventilation naturelle ne doit pas affecter de quelque façon que ce soit les règles ou les pratiques d'utilisation de moustiquaires.

Ce guide ne comporte que les règles fondamentales de conception, de construction, d'exploitation et de maintenance, et les concepteurs sont invités à consulter les guides et ouvrages d'ingénierie de conception pour tous détails techniques relatifs à la ventilation naturelle. L'attention du lecteur est attirée sur les limites de la ventilation naturelle, lorsque les forces naturelles telles que le vent ou la brise ne suffisent pas, en particulier, à fournir les hauts débits de ventilation recommandés dans ce guide pour les chambres de précautions aériennes. Il est rappelé aux utilisateurs de ne pas se référer uniquement au présent guide pour la conception d'installations ventilées naturellement.

Les hôpitaux et chambres de précautions aériennes ventilés naturellement doivent être conçus selon les règles, pour que la ventilation naturelle assure les débits de ventilation recommandés ; dans le cas contraire, des facteurs tels que le manque de contrôle de la direction du flux d'air peuvent se traduire par un risque de transmission accru. Les lecteurs intéressés sont invités à se procurer ou à consulter la documentation technique de référence lorsqu'ils envisagent une rénovation ou une construction comportant un système de ventilation naturelle.

Ce guide sera révisé cinq ans après sa publication pour tenir compte des données nouvelles sur les relations entre débits de ventilation naturelle et infection.

Plan de mise en œuvre

Ce guide portant sur un domaine nouveau, il n'existe pas de plan d'adaptation.

Un projet faisant suite à la présente publication et portant sur « la conception d'établissements de soins à coût modéré intégrant des moyens de lutte contre l'infection par la ventilation naturelle » est déjà en cours. Il vise à fournir une assistance à la conception d'établissements de soins à coût modéré ventilés naturellement, dans des contextes où les ressources disponibles sont faibles. On trouvera plus d'informations sur ce projet à l'adresse suivante : <http://www.who.int/csr/natvent>.

L'OMS entend fournir des exemples de conceptions types, des plans et une assistance pour la rénovation ou la construction d'établissements de soins, qui seront disponibles en ligne et téléchargeables gratuitement. Cette démarche s'appuiera sur les recommandations du présent guide pour inciter et aider à réaliser des établissements de soins à coût modéré intégrant les techniques de lutte contre l'infection, dans les pays à faible niveau de revenu, en utilisant des ressources accessibles et durables, et notamment (lorsque c'est possible) la ventilation naturelle.

Abréviations et définitions

Abréviations

RAH	(nombre de) renouvellements d'air par heure
EPI	équipements de protection individuelle
RAS	Région administrative spéciale
SRAS	syndrome respiratoire aigu sévère
TB	tuberculose
OMS	Organisation mondiale de la Santé

Definitions

Antichambre	Petite pièce servant de passage entre un couloir et une autre pièce (souvent une chambre d'isolement).
Chambre de précautions aériennes	Chambre où le nombre de renouvellements d'air par heure (RAH) est ≥ 12 et où la direction du flux d'air est contrôlée. La chambre peut être ventilée naturellement ou mécaniquement. En plus de l'exigence d'un RAH ≥ 12 , dans une chambre de précautions aériennes ventilée mécaniquement, une pression négative est créée pour contrôler la direction du flux d'air. Une telle chambre équivaut aux « chambres d'isolement en cas d'infection à transmission aérienne » décrites par les Centers for Disease Control and Prevention des États-Unis. Dans les chambres de précautions aériennes ventilées naturellement, le flux d'air doit être dirigé vers des zones exemptes de passage, ou assurer une dilution rapide de l'air contaminé dans les zones environnantes et à l'air libre (OMS, 2007).
Débit d'air recyclé	Quantité d'air réintroduit dans le local (recyclé). Bien que l'air recyclé puisse être filtré, il est souvent de moins bonne qualité que l'air extérieur, pour la plupart des applications courantes. L'air filtré et recyclé ne peut donc pas remplacer l'air extérieur pour la ventilation.
Exfiltration	Déperdition d'air vers l'extérieur d'un bâtiment, par des fuites non désirées.
Gouttelettes	Particules inhalables de plus de 5 μm de diamètre qui peuvent se déposer dans les voies respiratoires supérieures et sur les muqueuses.
Noyaux de condensation	Résidus de gouttelettes desséchés $< 5 \mu\text{m}$ de diamètre.
Gouttelettes respiratoires	Selon la taille des particules, les gouttelettes respiratoires peuvent être subdivisées en grosses gouttelettes, aérosols inhalables et noyaux de condensation (voir l'annexe C pour plus de précisions).
Infiltration	Entrée d'air dans un bâtiment par des fuites non désirées.

Mesures administratives	Ensemble de mesures organisationnelles visant à garantir les conditions nécessaires à l'application des principes de lutte contre l'infection en milieu de soins. Elles comprennent la mise en place d'infrastructures et d'activités pérennes de lutte contre l'infection, des politiques claires de dépistage précoce des infections, la mise en œuvre de mesures appropriées de lutte contre les infections, la mise à disposition de moyens et une organisation appropriée des services (création d'un système de tri et de placement des patients, notamment). La direction de l'établissement de soins doit en outre faire en sorte que les plannings de travail assurent un ratio patients/personnel adéquat, veiller à la formation des équipes et mettre en place des programmes de protection de la santé des soignants (vaccination, prophylaxie, notamment) afin d'améliorer l'état de santé général des soignants (OMS, 2007).
Nombre de renouvellements d'air par heure (RAH)	Pour une chambre en pression positive, rapport entre le volume d'air extérieur pénétrant en une heure dans un espace donné et le volume de cet espace. Pour une chambre en pression négative, le RAH est calculé à partir du débit d'air extrait.
Ouvertures de l'enveloppe	Ouvertures aménagées, dans un bâtiment, pour assurer la ventilation naturelle (fenêtres, portes, cheminées solaires, tours à vent, ventilateurs passifs (prises d'air)).
Pièce en pression négative	Fait référence à la différence de pression de l'air entre deux zones. Une pièce est en pression négative lorsque sa pression est inférieure à celle des zones voisines, ce qui prévient les fuites d'air vers les pièces ou zones voisines.
Précautions contre la transmission	Ensemble de pratiques applicables dans le cas de patients hospitalisés présentant des infections spécifiques pour lesquelles des précautions allant au-delà des précautions standard doivent être prises afin de lutter contre l'infection dans la structure de soins.
Procédures générant des aérosols	Procédures pouvant induire chez le patient la production de gouttelettes respiratoires.
Procédures générant des aérosols associées à la transmission d'agents pathogènes	Procédures à haut risque pouvant accroître le risque de formation de noyaux de condensation en raison des forces mécaniques liées à ces procédures (intubation, réanimation, bronchoscopie, autopsie, geste chirurgical comportant l'utilisation de dispositifs à grande vitesse, par exemple) (OMS, 2007).
Quantum	Quantité ou dose de particules.
Schéma de circulation de l'air comportant un court-circuit	Schéma de circulation de l'air, dans une pièce ventilée, où l'air neuf contourne des zones d'air stagnant et ressort directement par les bouches de sortie.
Système de ventilation mécanique à pression négative	Système de ventilation mécanique utilisant un ventilateur d'extraction d'air.
Système de ventilation mécanique à pression positive	Système de ventilation mécanique comportant un ventilateur d'admission par lequel l'air est introduit en force dans le local.
Système de ventilation mécanique double flux	Système dans lequel les flux d'air insufflé et extrait ont été testés et ajustés pour répondre à certaines spécifications de conception.

Système de ventilation naturelle assistée	Système de ventilation naturelle assistée par ordinateur, qui peut être secondé par des systèmes de ventilation mécanique.
Système de ventilation de type "piston"	Modèle de déplacement de l'air idéal, où l'air introduit d'un côté du local est poussé jusqu'au côté opposé sans aucun recyclage et en se mélangeant très peu à l'air du local. La ventilation de type piston est le mode de renouvellement d'air le plus efficace.
Transmission aérienne	<p>Transmission de maladies causée par la dissémination de noyaux de condensation, qui demeurent infectieux longtemps et sur de longues distances lorsqu'ils sont en suspension dans l'air.</p> <p>La transmission aérienne systématique concerne les agents pathogènes transmis uniquement par dépôt de noyaux de condensation en conditions naturelles (tuberculose pulmonaire, par exemple).</p> <p>La transmission aérienne préférentielle concerne les agents pathogènes dont la transmission peut emprunter de multiples voies mais qui sont transmis principalement par des noyaux de condensation (rougeole, varicelle, par exemple) (OMS 2007).</p>
Transmission aérienne opportuniste	Transmission de noyaux de condensation à faible distance, dans des circonstances particulières telles que la réalisation de procédures générant des aérosols associées à la transmission d'agents pathogènes.
Ventilation	La ventilation fournit de l'air extérieur à un bâtiment ou à une pièce et distribue l'air à l'intérieur du bâtiment. La ventilation des bâtiments a pour objet d'assainir l'atmosphère en diluant avec de l'air propre les polluants générés dans le bâtiment, et en assurant un débit d'air qui permet de renouveler l'air à une fréquence donnée. La ventilation sert aussi à combattre les odeurs, à assurer un confinement ou à réguler les paramètres climatiques (température et humidité relative).
Ventilation hybride	Combinaison de la ventilation mécanique et de la ventilation naturelle (autre terme : ventilation mixte).
Ventilation mixte	Voir <i>Ventilation hybride</i>
Ventilation naturelle	Utilisation de forces naturelles pour introduire et distribuer l'air extérieur dans un bâtiment, ou en extraire l'air. Ces forces naturelles peuvent être la pression du vent ou la pression générée par la différence de densité entre l'air intérieur et l'air extérieur.

1^{re} partie — Lutte contre l'infection et ventilation

La première partie a pour objet de définir les recommandations applicables à la ventilation naturelle dans le contexte de la lutte contre les infections. Le chapitre 1 expose les principes généraux de lutte contre l'infection en relation avec la ventilation. Le chapitre 2 présente les notions de base de la ventilation, ainsi que les éléments justifiant le recours à la ventilation naturelle pour lutter contre les infections. Le chapitre 3 traite des relations entre ventilation et infection à transmission aérienne et expose la démarche suivie et le consensus adopté par l'Organisation mondiale de la Santé en ce qui concerne les exigences minimales applicables à la conception de la ventilation naturelle dans le cadre de la lutte contre les infections.

1 Principes généraux de lutte contre l'infection

1.1 La notion de précaution d'isolement et son évolution dans le temps

La précaution d'isolement est une stratégie importante dans la pratique de la lutte contre les infections. La propagation de certaines infections peut être empêchée si les patients infectés sont séparés de ceux qui ne le sont pas. Bien qu'aucune étude ne montre l'efficacité de l'isolement, il est souvent fait état de l'efficacité des différentes composantes de l'isolement, en particulier du placement en chambres individuelles (Anderson et al., 1985) et du port d'équipements de protection comme les masques, gants et blouses (Klein, Perloff & Maki, 1989 ; Maki, 1994 ; Maloney et al., 1995).

On retrouve la notion d'isolement dès l'époque biblique, lorsque les lépreux étaient séparés du reste de la population. Vers la fin du XIX^e siècle, on a recommandé de placer les patients atteints de maladies infectieuses dans des établissements séparés, et des hôpitaux spécialisés dans les maladies infectieuses ont vu le jour (Lynch, 1949). Au début des années 1950 cependant, bon nombre de ces hôpitaux ont fermé et les patients ont été transférés dans des hôpitaux généraux. La nécessité de l'isolement prenait, dans ce contexte, une acuité particulière. Depuis lors, différents systèmes d'isolement ont été développés (NCDC, 1970 ; Lowbury et al., 1975 ; Garner & Simmons, 1983), les précautions les plus couramment appliquées contre la transmission comprenant les précautions standard (destinées à éviter un contact direct, non protégé, avec le sang et les fluides corporels), les précautions « contact », les précautions « gouttelettes » et les précautions aériennes (Gardner, 1996 ; Siegel et al, 2007).

La séparation spatiale est essentielle, dans les précautions d'isolement, car comme le notait Florence Nightingale, un grand nombre de maladies infectieuses se propagent principalement par contact direct entre patients. En règle générale, des mesures de ventilation spéciales ne sont pas requises ; elles sont nécessaires pour les maladies qui peuvent être transmises à distance par des noyaux de condensation (Gardner, 1996). La plupart des maladies ne relèvent pas de cette catégorie. Toutefois, pour les maladies infectieuses transmissibles sur de longues distances par des aérosols (maladies à transmission aérienne), on peut observer la survenue de nombreux cas groupés sur de courtes périodes. C'est pourquoi l'isolement des patients atteints de ces maladies est crucial.

Le présent guide traite des recommandations spécifiques applicables à la ventilation naturelle utilisée à des fins d'isolement en cas d'infections à transmission aérienne (point 3.2).

1.2 Pratiques d'isolement dans la lutte contre l'infection

Ce guide ne comporte pas une description détaillée de l'ensemble des précautions applicables contre la transmission des infections, mais traite uniquement des précautions aériennes. On trouvera dans diverses sources une description des autres types de précautions (Siegel et al., 2007 ; OMS, 2007).

Dans la mise en œuvre des précautions d'isolement, trois niveaux de mesures doivent être envisagés (Gerberding, 1993).

Le premier niveau comporte des mesures administratives, destinées à assurer un fonctionnement efficace de l'ensemble du système. Il s'agit notamment des mesures suivantes :

- mise en œuvre de procédures appropriées pour le tri des patients
- dépistage précoce des infections
- séparation des patients infectés et non infectés
- transfert des patients
- éducation des patients et du personnel
- définition adéquate et claire des responsabilités
- communication avec tous les partenaires concernés.

Le second niveau comprend des mesures « environnementales et techniques » comme le nettoyage, la séparation spatiale et la ventilation des espaces.

Le troisième niveau de mesures, destiné à réduire encore le risque de transmission, est la protection individuelle, et donc la fourniture d'équipements de protection individuelle (EPI) adaptés (masques, équipements de protection respiratoire, en particulier).

Lors de la mise en place d'un système d'isolement à l'hôpital, ces trois niveaux (mesures administratives, mesures environnementales et techniques, protection individuelle) doivent être convenablement pris en compte pour que le système fonctionne efficacement et que ses différents niveaux se complètent.

1.3 Pratiques d'isolement dans le cas des infections à transmission aérienne

La transmission par voie aérienne se fait par dissémination de noyaux de condensation sur de longues distances à partir des patients infectés (pour plus de précisions sur les gouttelettes respiratoires, voir l'annexe C). Pour que des agents pathogènes se propagent par cette voie, il faut que certaines conditions soient réunies, et notamment :

- présence d'un agent pathogène viable à l'intérieur de la gouttelette source ;
- survie de l'agent pathogène à l'intérieur de la gouttelette après séparation de la source, et conservation de son pouvoir infectieux après exposition à divers facteurs physiques (évaporation, lumière, température, humidité relative, etc.) ;

- dose suffisante pour provoquer l'infection chez un hôte sensible ; et
- exposition d'un hôte sensible.

Les agents infectieux susceptibles d'être propagés par les courants d'air sur de longues distances et d'infecter des personnes réceptives sont notamment *Mycobacterium tuberculosis* (Riley et al., 1957, 1959), le virus de la rougeole (Bloch et al., 1985) et Varicella-zoster virus (varicelle) (Gustafson et al., 1982). Pour prévenir la propagation des infections à transmission aérienne, il faut mettre en œuvre des précautions aériennes, comprenant les trois types de mesures citées au point 1.2 : mesures administratives ; mesures environnementales et techniques — traitement de l'air et ventilation spécifiques dans la chambre des patients ; EPI — port d'équipements de protection respiratoire antiparticules par les soignants, dans la mesure du possible (OMS, 2007).

Les patients devant faire l'objet d'un isolement destiné à empêcher la transmission aérienne doivent être placés dans une chambre de précautions aériennes (OMS, 2007). Il s'agit d'une chambre où le nombre de renouvellements d'air par heure (RAH) est ≥ 12 (soit ≥ 80 l/s pour une chambre de $4 \times 2 \times 3$ m³) et où la direction du flux d'air est contrôlée, ce qui permet d'assurer le confinement des infections à transmission aérienne (AIA, 2001 ; Wenzel, 2003 ; Mayhall, 2004 ; OMS, 2007). Une chambre à ventilation mécanique équivaut aux chambres d'isolement en cas d'infection à transmission aérienne décrites par les Centers for Disease Control and Prevention des États-Unis, où le traitement et l'écoulement d'air doivent présenter des caractéristiques spécifiques telles que (CDC, 2003) :

- un gradient de pression négatif $\geq 2,5$ Pa (0,01 pouce de colonne d'eau) ;
- une différence de débit d'air >125 -cfm (56 l/s) entre l'extraction et l'alimentation ;
- un écoulement d'air de la zone propre vers la zone sale ;
- une isolation étanche de la pièce, laissant environ 0,5 pieds carrés (0,046 m²) de fuite ;
- un RAH ≥ 12 pour un bâtiment neuf, et un RAH ≥ 6 pour un bâtiment existant, équivalant à 40 l/s pour une pièce de $4 \times 2 \times 3$ m³ dans un bâtiment ancien ; et
- une extraction d'air vers l'extérieur, ou un filtre HEPA si l'air est recyclé.

L'idée d'une ventilation naturelle des chambres de précautions aériennes était envisagée dans les recommandations provisoires de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2007). La ventilation naturelle peut être utilisée dans ce type de chambres. L'objet du présent document est de fournir des principes élémentaires de conception en cas d'utilisation de la ventilation naturelle dans la lutte contre les infections. Des « guides de conception » plus détaillés suivront la publication de ce document.

1.4 Lutte contre l'infection lors des procédures à haut risque

La mise en œuvre de précautions aériennes a été recommandée, après l'épidémie de syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS), pour les patients atteints de tuberculose pulmonaire active, de rougeole, de variole et de varicelle. Cependant, on a également observé que dans certaines situations, d'autres agents pathogènes non transmissibles par voie aérienne pouvaient être transmis par des noyaux de condensation lors de certaines procédures de soins.

Il n'existe pas, actuellement, de définition claire ou de liste précise des procédures de soins à haut risque au cours desquelles certains agents pathogènes (le Coronavirus responsable du SRAS, le virus de la grippe) peuvent se propager sur de courtes distances via les noyaux de condensation. Le mécanisme de cette transmission est décrit comme une transmission aérienne opportuniste (Roy & Milton, 2004), et les procédures à haut risque peuvent accroître la formation de noyaux de condensation en raison des forces mécaniques liées à ces procédures (Ip et al., 2007). Certaines de ces procédures ont été associées à une augmentation significative du risque de transmission des infections, et ont été désignées par le terme de procédures générant des aérosols associées à la transmission d'agents pathogènes (OMS, 2007). Ces procédures sont notamment l'intubation, la réanimation, la bronchoscopie, l'autopsie et les actes chirurgicaux faisant intervenir des dispositifs à grande vitesse (OMS, 2007).

Comme dans tous les domaines de la lutte contre l'infection, les mesures administratives, les mesures environnementales et techniques et le port d'EPI doivent être utilisés conjointement pour combattre la propagation des infections lors des procédures à haut risque.

Au titre des mesures administratives, il est primordial de limiter ces procédures aux patients qui en ont besoin. Une formation adéquate du personnel et la fourniture d'équipements sûrs peuvent également jouer un rôle important dans la réduction du risque. Le port d'EPI adaptés, notamment d'équipements de protection respiratoire antiparticules, d'une protection oculaire, de blouses et de gants, constitue une protection complémentaire pour les soignants. Enfin, la réalisation de ces procédures dans un lieu bien ventilé, à distance des autres patients et soignants, peut contribuer à prévenir la propagation de l'infection. Bien qu'aucune étude n'ait évalué l'impact de la ventilation sur la réduction du risque lié à des noyaux de condensation infectieux lors des procédures générant des aérosols, il est préférable de réaliser ces procédures dans une pièce convenablement ventilée, en particulier dans le cas de patients infectés par des agents pathogènes mettant la vie en danger (SRAS, grippe aviaire, par exemple).

Cependant, il peut être difficile de mettre en œuvre les mesures mentionnées ci-dessus, en particulier en situation d'urgence (réanimation d'un patient en consultation externe, par exemple). Il importe donc de mettre en place des plans d'intervention pour ce type de scénarios et de disposer d'un service d'urgences convenablement équipé et bien ventilé. Les patients pourraient alors être transférés rapidement dans un lieu sûr, bien ventilé, préalablement identifié pour ce type de situation. Il importe également de canaliser les flux de personnes pour limiter les contacts avec les patients. Les soignants doivent porter des EPI adaptés avant d'entamer une procédure à haut risque.

1.5 Résumé

En résumé, bien qu'il y ait peu de données documentées montrant une relation entre les précautions d'isolement et la prévention des infections, divers rapports et études de cas indiquent que des mesures d'isolement (chambres individuelles et EPI, notamment) peuvent contribuer à prévenir la propagation des infections dans les établissements de soins.

Tous les éléments d'un système d'isolement (mesures administratives, mesures environnementales et techniques, protection individuelle) sont importants et doivent être pris en compte dans la conception d'un système d'isolement à l'hôpital. Les systèmes d'isolement doivent être conçus pour prévenir la propagation des maladies sur de longues distances via les gouttelettes respiratoires, une attention particulière étant en outre accordée à la prévention des transmissions lors des procédures à haut risque (intubation, réanimation, bronchoscopie, autopsie, actes chirurgicaux faisant intervenir des dispositifs à grande vitesse, notamment).

2 Concepts et types de ventilation

2.1 La ventilation

La ventilation introduit de l'air extérieur dans un bâtiment ou une pièce et distribue l'air dans ce bâtiment ou cette pièce. L'objet général de la ventilation des bâtiments est d'assainir l'atmosphère en diluant les polluants formés dans le bâtiment et en évacuant ces polluants (Etheridge & Sandberg, 1996 ; Awbi, 2003).

Trois éléments de base caractérisent la ventilation des bâtiments :

- *le débit de ventilation* — quantité d'air extérieur introduite dans l'espace, et qualité de l'air extérieur (voir l'annexe D) ;
- *la direction du flux d'air* — direction générale du flux d'air dans un bâtiment, qui doit aller des zones propres aux zones sales ; et
- *le mode de distribution ou d'écoulement de l'air* — l'air extérieur doit être distribué efficacement, en tout point de l'espace ventilé, et tout point de l'espace ventilé doit être débarrassé efficacement des polluants aéroportés qui y sont générés.

Trois méthodes peuvent être utilisées pour ventiler un bâtiment : la ventilation naturelle, la ventilation mécanique et la ventilation hybride (mixte).

2.1.1 La ventilation naturelle

Des forces naturelles (vents et tirage thermique dû à la différence de densité entre l'air intérieur et l'air extérieur, notamment) font pénétrer l'air extérieur dans le bâtiment à travers des ouvertures pratiquées à cet effet dans l'enveloppe du bâtiment (fenêtres, portes, cheminées solaires, tours à vent et ventilateurs passifs (prises d'air), notamment). Ce mode de ventilation des bâtiments dépend du climat, de la conception des bâtiments et du comportement des personnes.

2.1.2 La ventilation mécanique

Ce mode de ventilation fait appel à des ventilateurs mécaniques installés soit directement dans les fenêtres ou les murs, soit dans des conduits d'air, pour alimenter un local en air ou extraire l'air du local.

Le type de ventilation mécanique utilisé dépend du climat. Lorsque le climat est chaud et humide, il peut être nécessaire de limiter ou de prévenir l'infiltration pour réduire la condensation interstitielle (qui se produit lorsque l'air chaud et humide provenant de l'intérieur d'un bâtiment pénètre dans un mur, un plafond ou un plancher et rencontre une surface froide). En pareil cas, on utilise souvent un système de ventilation mécanique à pression positive. À l'inverse, lorsque le climat est froid, c'est l'exfiltration qu'il faut éviter pour réduire la condensation interstitielle, et l'on utilise une ventilation à pression négative. Pour une pièce comportant des polluants générés localement, telle qu'une salle de bain, des toilettes ou une cuisine, on utilise souvent un système à pression négative.

Dans un système à pression positive, la pièce est en pression positive et l'air de la pièce s'échappe par les fuites de l'enveloppe ou d'autres ouvertures. Dans un système à pression négative, la pièce est en pression négative et de l'air extérieur est « aspiré » dans la pièce. Un système de ventilation mécanique double flux est un système où l'apport et l'extraction d'air ont été testés et ajustés pour remplir certaines spécifications de conception. La pression de la pièce peut être maintenue soit en légère surpression, soit en légère dépression, en créant une légère différence entre les débits d'admission et d'extraction d'air. Ainsi, une pression légèrement négative est obtenue par un débit d'air extrait de 10 % supérieur au débit d'admission, sous les climats froids, pour réduire les risques de condensation interstitielle. Dans une chambre de précautions aériennes conçue pour la lutte contre les infections, on maintient souvent une pression négative de 2,5 Pa au minimum par rapport au couloir (CDC, 2003).

2.1.3 La ventilation hybride ou mixte

Dans la ventilation hybride (mixte), des forces naturelles assurent le débit d'air souhaité (valeur de consigne). La ventilation mécanique est utilisée lorsque le débit obtenu par ventilation naturelle est trop faible (Heiselberg & Bjørn, 2002).

Lorsque la ventilation naturelle ne suffit pas, des ventilateurs d'extraction (dûment calculés et testés au préalable) peuvent être installés pour accroître les débits de ventilation dans les chambres recevant des patients atteints d'infections à transmission aérienne. Cependant, ce type simple de ventilation hybride (mixte) doit être utilisé avec prudence. Les ventilateurs doivent être installés à des emplacements où l'air de la pièce peut être rejeté directement dans l'environnement extérieur, à travers un mur ou par le toit. La taille et le nombre de ventilateurs d'extraction dépendent du débit de ventilation recherché, et doivent être préalablement calculés et testés.

L'utilisation de ventilateurs d'extraction peut poser divers problèmes : difficultés d'installation (notamment pour les grands ventilateurs), bruit (en particulier dans le cas de ventilateurs très puissants), élévation ou baisse de température dans la pièce, et nécessité d'une alimentation électrique permanente. Si l'ambiance thermique de la pièce est inconfortable, des systèmes localisés de rafraîchissement ou de chauffage peuvent être ajoutés, ainsi que des ventilateurs de plafond.

Une autre possibilité est l'installation d'extracteurs éoliens, qui ne requièrent pas d'alimentation électrique et créent une extraction en toiture permettant d'accroître la circulation d'air dans un bâtiment (voir la figure I.2 de l'annexe I).

2.2 Évaluation des performances de la ventilation

Les performances de la ventilation dans les bâtiments peuvent être évaluées à partir des quatre aspects suivants, correspondant aux trois éléments de base de la ventilation cités plus haut.

- Le système assure-t-il le débit de ventilation souhaité ?
- La direction générale d'écoulement de l'air dans le bâtiment est-elle orientée des zones propres aux zones sales (chambres d'isolement ou zones de confinement — laboratoires, par exemple) ?

- L'apport d'air extérieur par le système est-il efficacement assuré en tout point de la pièce ?
- Les polluants sont-ils efficacement évacués par le système en tout point de la pièce ?

Deux indicateurs de performances globales sont souvent utilisés. L'efficacité du renouvellement d'air indique l'efficacité de la distribution d'air frais dans la pièce, et l'efficacité de la ventilation indique l'efficacité d'élimination des polluants atmosphériques de la pièce. Les ingénieurs définissent l'âge moyen de l'air en un point comme le temps moyen mis par l'air pour parvenir à ce point depuis son point d'entrée dans la pièce, et l'âge moyen de l'air dans la pièce comme la moyenne des âges de l'air en tous points de la pièce (Etheridge & Sandberg, 1996). L'âge de l'air peut être mesuré par la technique des gaz traceurs (Etheridge & Sandberg, 1996).

L'efficacité du renouvellement d'air peut être calculée à partir du nombre de renouvellements d'air par heure et de l'âge moyen de l'air dans la pièce (Etheridge & Sandberg, 1996). Dans le cas de la ventilation en mode « piston », l'efficacité du renouvellement d'air est de 100 %, contre 50 % dans le cas des systèmes de ventilation assurant un mélange complet de l'air. Dans le cas de la ventilation par déplacement, l'efficacité du renouvellement d'air se situe entre ces deux valeurs, mais en cas de court-circuit, elle peut être inférieure à 50 %.

L'efficacité de la ventilation peut être évaluée soit par mesurage, soit par simulation (Etheridge & Sandberg, 1996). En termes simples, le débit de ventilation peut être établi en déterminant la vitesse à laquelle un gaz traceur injecté dans la pièce est éliminé, ou à partir de la vitesse de l'air mesurée au niveau des orifices ou des conduits de ventilation et de la section d'écoulement. La direction d'écoulement de l'air peut être visualisée au moyen de fumée. Les études de dynamique des fluides par modélisation numérique et les techniques de vélocimétrie par image de particules permettent de modéliser les performances de distribution de l'air dans une pièce (Nielsen, 1974 ; Chen, 1996 ; Etheridge & Sandberg, 1996).

2.3 Comparaison de la ventilation mécanique et de la ventilation naturelle

2.3.1 La ventilation mécanique

S'il est bien conçu, installé et entretenu, un système de ventilation mécanique présente certains avantages.

- Les systèmes de ventilation mécaniques sont considérés comme fiables pour ce qui est de la fourniture du débit d'air prévu à la conception, quelles que soient les variations du vent et de la température ambiante. La ventilation mécanique étant facile à intégrer à un système de conditionnement d'air, la température et l'humidité de l'air intérieur peuvent aussi être régulées.
- Des systèmes de filtration peuvent être intégrés à la ventilation mécanique, pour éliminer les micro-organismes, particules, gaz, odeurs et vapeurs nocifs.

- Le cheminement de l'air peut être guidé, dans les systèmes de ventilation mécanique, de façon par exemple à faire s'écouler l'air des zones comportant une source (patient présentant une infection à transmission aérienne, par exemple) vers des zones exemptes de personnes réceptives.
- Un système de ventilation mécanique peut fonctionner en tout lieu disposant de l'électricité.

Toutefois, les systèmes de ventilation mécanique peuvent poser divers problèmes.

- Il est fréquent que les systèmes de ventilation mécanique ne fonctionnent pas comme prévu, et leur fonctionnement peut être interrompu pour de multiples raisons telles qu'une défaillance des équipements, une interruption de l'alimentation en énergie, une conception défectueuse, un défaut de maintenance ou une mauvaise gestion (Dragan, 2000). Si le système dessert un établissement à risque et qu'il importe qu'il fonctionne en continu, il peut être nécessaire de prévoir des équipements de secours — ce qui peut se révéler coûteux et impossible à assurer sur le long terme.
- Les coûts d'installation et, surtout, de maintenance d'un système de ventilation mécanique peuvent être très élevés. Si un système mécanique ne peut pas être installé ou entretenu correctement pour des raisons financières, ses performances seront compromises.

Pour ces raisons, un système de ventilation mécanique peut favoriser la propagation de maladies infectieuses dans un établissement de soins, au lieu de contribuer efficacement à la lutte contre l'infection.

2.3.2 La ventilation naturelle

S'il est bien installé et entretenu, un système de ventilation naturelle présente plusieurs avantages par rapport à un système de ventilation mécanique.

- La ventilation naturelle assure généralement un débit de ventilation élevé à moindre coût, du fait de l'utilisation de forces naturelles et de grandes ouvertures.
- La ventilation naturelle peut avoir un meilleur rendement énergétique, en particulier si un chauffage n'est pas nécessaire.
- Une ventilation naturelle bien conçue offre la possibilité d'assurer un meilleur niveau d'éclairage naturel.

D'un point de vue technique, on peut distinguer les systèmes de ventilation naturelle simple et les systèmes de ventilation naturelle assistée. Ces derniers sont commandés par ordinateur et peuvent être complétés par des systèmes de ventilation mécanique (systèmes hybrides ou mixtes). Les systèmes de ventilation naturelle assistée peuvent présenter les mêmes inconvénients que les systèmes de ventilation mécanique, mais ils bénéficient aussi des avantages des deux systèmes.

Si elle est bien conçue, la ventilation naturelle peut être fiable, notamment lorsqu'elle est combinée à un système mécanique et utilise le principe de la ventilation hybride (mode mixte), bien que certains systèmes modernes de ventilation naturelle puissent être plus coûteux à construire et à concevoir que les systèmes mécaniques.

En général, l'avantage de la ventilation naturelle est sa capacité à assurer un taux de renouvellement d'air très élevé à faible coût, par des moyens très simples. Bien que le taux de renouvellement d'air puisse présenter des variations significatives, les bâtiments équipés de systèmes modernes de ventilation naturelle (correctement conçus et exploités) peuvent atteindre par le seul effet des forces naturelles des taux de renouvellement d'air très élevés, dépassant parfois largement les exigences minimales de ventilation.

Les systèmes de ventilation naturelle présentent certains inconvénients.

- La ventilation naturelle est variable et dépend des conditions climatiques extérieures par rapport à l'environnement intérieur. Les deux forces déterminant le débit d'air (le vent et la différence de température) sont sujettes à des variations stochastiques. La ventilation naturelle peut être difficile à réguler, avec des flux d'air excessifs et inconfortables en certains points, et des zones d'air stagnant. Le taux de renouvellement d'air peut être faible lorsque les conditions climatiques sont défavorables.
- Il peut être difficile de maîtriser la direction du flux d'air du fait de l'absence d'une pression négative suffisamment soutenue ; il en résulte un risque de contamination des couloirs et des pièces voisines.
- La ventilation naturelle rend impossible l'usage de filtres à particules.
- Des considérations climatiques, culturelles ou de sécurité peuvent obliger à laisser les fenêtres et les orifices d'aération fermés ; les débits de ventilation peuvent alors être considérablement réduits.
- La ventilation naturelle ne fonctionne que lorsque les forces naturelles nécessaires sont disponibles ; lorsque des débits d'air élevés sont requis, il faut que les forces naturelles puissent assurer de tels débits.
- Il est fréquent que les systèmes de ventilation naturelle ne fonctionnent pas comme prévu, et leur fonctionnement peut être interrompu pour de multiples raisons : portes ou fenêtres non ouvertes, défaillances des équipements (dans le cas des systèmes assistés), interruption de l'alimentation en énergie (dans le cas des systèmes assistés), conception défectueuse, défaut de maintenance, mauvaise gestion, notamment.
- Bien que les coûts de maintenance des systèmes de ventilation naturelle simple puissent être très bas, si un système de ventilation naturelle ne peut pas, pour des raisons financières, être correctement installé ou entretenu, ses performances peuvent être compromises, ce qui entraîne un risque accru de transmission d'agents pathogènes aéroportés.

Il est possible de surmonter ces difficultés en optimisant la conception, par exemple, ou en recourant à la ventilation hybride (mixte). D'autres inconvénients possibles, comme le bruit, la pollution atmosphérique, la présence d'insectes vecteurs ou les problèmes de sécurité, doivent également être pris en compte. Pour ces raisons, les systèmes de ventilation naturelle peuvent favoriser la propagation de maladies infectieuses au sein des établissements de soins, au lieu de contribuer efficacement à la lutte contre les infections.

Le tableau 2.1 récapitule les avantages et les inconvénients des différents systèmes de ventilation en milieu hospitalier.

Tableau 2.1 Principaux avantages et inconvénients des différents types de systèmes de ventilation en milieu hospitalier

	Ventilation mécanique	Ventilation naturelle	Ventilation hybride (mixte)
Avantages	Convient à tous les climats et types de temps, associée au conditionnement d'air si le climat l'exige	Convient aux climats chauds et tempérés, peu adaptée si la ventilation naturelle n'est possible qu'à 50 % du temps	Convient à la plupart des climats et types de temps
	Environnement plus contrôlé et confortable	Coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance faibles pour la ventilation naturelle simple	Économise l'énergie
	Faibles possibilités d'action sur l'environnement pour les occupants	Peut fournir un débit de ventilation élevé Larges possibilités d'action sur l'environnement pour les occupants	Plus flexible
Inconvénients	Installation et maintenance coûteuses	Facilement affectée par le climat extérieur et/ou le comportement des occupants	Peut être coûteuse
	Défaillances signalées en ce qui concerne le débit d'air frais requis	Plus difficile à prévoir, analyser et concevoir	Peut être plus difficile à concevoir
	Risque de bruit lié aux équipements	Confort réduit lorsqu'il fait chaud, humide ou froid Ne permet pas d'établir une pression négative en zones d'isolement, sauf par une conception spécifique ; dépend de la situation Risque d'intrusion des bruits extérieurs La ventilation naturelle assistée présente certains des inconvénients et limites de la ventilation mécanique	

2.4 Ventilation mécanique ou ventilation naturelle dans la lutte contre l'infection

La décision de recourir à la ventilation mécanique ou à la ventilation naturelle pour lutter contre les infections doit être fondée sur les besoins, les ressources disponibles et le coût du système offrant la meilleure efficacité en matière de prévention des risques.

Au Royaume-Uni, par exemple, la politique des services de santé (National Health Service, NHS) tend à limiter la ventilation mécanique aux principales zones de traitement médical comme les chambres d'isolement de patients atteints d'infection à transmission aérienne, les salles d'opération et les locaux annexes. Il n'est généralement pas exigé que les chambres des patients soient systématiquement équipées d'une ventilation mécanique, et la ventilation naturelle par ouverture des fenêtres est la solution la plus courante (Mills, 2004). Mills (2004) souligne que « le traitement de l'air est l'un des principaux postes de dépense énergétique dans les hôpitaux. L'étude d'un hôpital à bas profil énergétique a identifié ce domaine comme l'un de ceux où il est possible de réaliser des économies en utilisant la ventilation naturelle dans toutes les zones « non cliniques », et les directives actuelles du NHS ont adopté cette conclusion ». À l'inverse, le guide de conception de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE, 2007a, 2007b) préconise de ventiler mécaniquement toutes les zones.

La ventilation mécanique des chambres d'isolement a un coût d'installation et de maintenance élevé. De plus, il est fréquent qu'elle n'assure pas le débit de ventilation recommandé et ne parvienne pas à maintenir une pression négative (les chambres sont même parfois en pression positive). Ainsi, Pavelchak et al. (2000), qui ont évalué 140 chambres d'isolement en cas d'infection à transmission aérienne dans 38 établissements entre 1992 et 1998, ont constaté qu'un flux d'air sortant de la chambre des patients était observé dans 38 % des établissements. Les principaux facteurs associés à un fonctionnement incorrect des chambres d'isolement étaient les suivants :

- réglage défectueux des flux d'air entrant et sortant (54 % de chambres non conformes)
- antichambres partagées (14 %)
- régimes d'écoulement d'air turbulents (11 %)
- système de commande automatique imprécis (10 %).

De plus, une série de problèmes liés à l'utilisation de la ventilation mécanique peuvent résulter de l'absence de concertation entre personnel médical et technique, ce qui peut aussi se produire dans le cas de la ventilation naturelle. Exemples (ISIAQ, 2003) :

- l'absence de contrôle lors de travaux dans les bâtiments peut affecter les zones proches soumises à des exigences de propreté particulières ;
- il n'est pas rare que des systèmes de ventilation complexes et coûteux ne soient pas correctement intégrés à la conception des bâtiments, correctement entretenus, voire correctement utilisés ;
- le personnel médical manque souvent de connaissances sur les performances opérationnelles attendues des systèmes de ventilation, y compris en ce qui concerne leurs fonctions de protection ; des systèmes bien conçus à l'origine peuvent être mal

utilisés, au point que leurs fonctionnalités soient réduites, ce qui se traduit par une augmentation des risques.

Autres problèmes liés à la ventilation mécanique : la perte de différentiel de pression négatif dans les chambres d'isolement, due à l'ouverture des portes ; le colmatage des filtres ; ou encore la présence d'espaces voisins en dépression (Fraser et al., 1993 ; Dahl et al., 1996 ; Sutton et al., 1998 ; Pavelchak et al., 2001 ; Rice, Streifel & Vesley, 2001).

En réponse à l'épidémie de syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS) en 2003, le gouvernement de la RAS de Hong Kong a construit 558 chambres d'isolement dédiées au SRAS, comportant plus de 1300 lits dans 14 hôpitaux. La pression négative, le cheminement de l'air, le taux de renouvellement d'air et l'efficacité locale de la ventilation ont été mesurés dans quelques chambres d'isolement de neuf grands hôpitaux (Li et al., 2007). Sur les 38 chambres testées, 97 % présentaient la différence de pression négative recommandée, à savoir 2,5 Pa, entre le couloir et l'antichambre ; et 89 % des 38 chambres testées étaient conformes à cette même exigence à l'interface entre l'antichambre et les boxes. Bien qu'il n'ait pas été constaté de fuite d'air vers le couloir, 60 % des toilettes/cabinets de toilette étaient en pression positive. Plus de 90 % des portes couloir-antichambre ou antichambre-box présentaient un flux bidirectionnel lorsque la porte était ouverte. Sur les 35 boxes testés, 26 % avaient un taux de renouvellement d'air par heure (RAH) inférieur à 12.

La plupart de ces problèmes peuvent survenir également dans le cas de la ventilation naturelle.

Une analyse comparative des systèmes de ventilation mécanique et naturelle a été conduite dans huit hôpitaux de Lima, au Pérou (Escombe et al., 2007). Cinq de ces hôpitaux avaient une conception « à l'ancienne » (construction avant 1950) et trois d'entre eux, une conception « moderne » (construction entre 1970 et 1990). Soixante-dix chambres à ventilation naturelle recevant des patients infectieux ont été étudiées, et comparées à 12 chambres d'isolement respiratoire à pression négative ventilées mécaniquement, construites après 2000. L'analyse a montré :

- que l'ouverture des fenêtres et des portes assurait une ventilation médiane de 28 RAH — plus du double des 12 RAH recommandés dans les locaux en pression négative ventilés mécaniquement, mais que ce résultat dépendait de l'utilisation qui était faite des portes et fenêtres ; aucune de ces salles n'était normalement utilisée portes et fenêtres ouvertes ;
- que les établissements construits il y a plus de 50 ans, caractérisés par de grandes fenêtres et de grandes hauteurs sous plafond (donc des volumes par patient relativement élevés) étaient plus ventilés, lorsque les fenêtres et les portes étaient ouvertes, que les chambres à ventilation naturelle actuelles (40 RAH contre 17 RAH).

Toutefois, ces résultats doivent être utilisés avec prudence. Les taux de ventilation étaient indiqués sans précisions sur les conditions climatiques (vitesse et direction du vent, notamment). La mesure du taux de ventilation était en outre affectée par le dispositif de mesure du dioxyde de carbone, et par le fait que les mesures étaient réalisées dans des bâtiments comportant de multiples espaces interconnectés, ce qui a dû affecter les conditions de mélange dans l'espace intérieur faisant l'objet des mesures.

2.5 Résumé

L'utilisation de l'air extérieur pour la ventilation naturelle, combinée aux méthodes naturelles de refroidissement, et l'utilisation de la lumière du jour, ont été des éléments essentiels de l'architecture depuis les temps les plus anciens jusqu'à la première partie du XX^e siècle (ASHRAE, 2007b). L'architecture classique, avec ses niveaux en H, L, T ou U, ses cours ouvertes, ses profondeurs de bâtiments limitées et ses grandes fenêtres, permettait de tirer parti de la ventilation naturelle et de la lumière du jour. Dans les pays à niveau de revenus élevé ou moyen, la ventilation naturelle a récemment été remplacée dans bien des cas par une ventilation mécanique. Les systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air entièrement mécanisés semblaient pouvoir résoudre tous les problèmes pratiques liés à la ventilation naturelle et permettre de contrôler les conditions climatiques dans les locaux tout au long de l'année.

Cependant, la ventilation mécanique requiert une conception soignée, une maintenance stricte des équipements, l'adoption de normes rigoureuses et des directives de conception intégrant tous les aspects liés à la qualité de l'environnement intérieur et à l'efficacité énergétique (ASHRAE, 2007b). Il en va de même de la ventilation naturelle assistée. La ventilation naturelle pose, elle aussi, des problèmes, particulièrement dans les pays où les hivers sont froids. Une réflexion doit être menée sur la conception de systèmes de ventilation fiables et peu coûteux favorisant plus qu'ils n'évitent la circulation de l'air tout en permettant de contrôler la température intérieure.

En conséquence, les systèmes de ventilation naturelle et mécanique peuvent, en pratique, être également efficaces pour lutter contre les infections. Cependant, la ventilation naturelle ne fonctionne que lorsque des forces naturelles comme le vent ou la brise sont disponibles, et lorsque les ouvertures d'admission et de sortie de l'air sont maintenues ouvertes. D'un autre côté, les difficultés liées à l'installation et à la maintenance d'un système de ventilation mécanique peuvent se traduire par une concentration élevée de noyaux de condensation infectieux et, en définitive, par un risque accru de transmission de maladies.

Dans les établissements de soins existants ventilés naturellement, ce mode de ventilation devrait être optimisé, lorsque c'est possible, avant d'envisager d'autres systèmes de ventilation. Cela suppose toutefois que les conditions climatiques se prêtent à ce choix.

3 Infection et ventilation

3.1 Relations entre ventilation et infection

Il n'existe guère de données attestant que la ventilation réduise directement le risque de transmission de maladies, mais de nombreuses études suggèrent qu'une ventilation insuffisante accroît la transmission. Un grand nombre d'études ont porté sur les voies de transmission possibles des maladies, mais peu d'études ont été consacrées à l'impact de la ventilation sur la transmission.

Historiquement, la notion de propagation aérienne a été décrite pour la première fois par Wells (1934, 1955), puis par Riley & O'Grady (1961). L'équation de Wells-Riley (Riley, Murphy & Riley, 1978) a été utilisée pour évaluer l'effet de la ventilation, de la filtration et d'autres processus physiques sur la transmission par des noyaux de condensation (Nardell et al., 1991 ; Fennelly & Nardell, 1998).

La détection d'agents pathogènes dans l'air des locaux et dans les bâtiments peut évoquer une relation indirecte entre ventilation et transmission (Artenstein et al., 1967 ; Sawyer et al., 1994 ; Aintablian, Walpita & Sawyer, 1998 ; Mastorides et al., 1999 ; Suzuki et al., 2002, 2003 ; Booth et al., 2005 ; Chen & Li, 2008 ; Huynh et al., 2008). Toutefois, d'autres aspects (dose infectante, susceptibilité de l'hôte, infectiosité de l'agent pathogène, autres facteurs environnementaux) sont importants pour déterminer la possibilité de transmission d'un agent pathogène. C'est pourquoi des données sur la présence d'agents pathogènes dans l'air ne suffisent pas à établir un risque de transmission de maladies, et doivent être utilisées conjointement à d'autres données (épidémiologiques, notamment).

Pour l'élaboration de ce guide, une revue systématique de la littérature jusqu'en juin 2008 a été réalisée (annexe A) ; elle avait pour objet de répondre à deux questions :

1. Le taux ou débit de ventilation (mesuré en renouvellements d'air par heure — RAH — ou en m^3/s) contribue-t-il à réduire (i) les taux d'infection ou (ii) les flambées de cas de maladies infectieuses liés à des agents transmis par chacun des modes de transmission du tableau 3.1, chez (a) les patients, (b) les soignants et/ou (c) d'autres aidants (membres de la famille, par exemple) ? Si oui, quel taux de ventilation a-t-on associé à chaque agent infectieux ?
2. Le flux d'air ou la direction de l'air contribuent-ils à réduire (i) les taux d'infection ou (ii) les flambées de cas de maladies infectieuses liés à des agents transmis par chacun des modes de transmission, chez (a) les patients, (b) les soignants et/ou (c) d'autres aidants (membres de la famille, par exemple) ? Si oui, quelles caractéristiques ou quelle direction du flux d'air a-t-on associées à ce résultat ?

Tableau 3.1 Champ et définition des trois modes de transmission retenus pour la revue systématique

Mode de transmission	Définition	Exemples d'agents pathogènes
Aérienne	Transmission de maladies causée par la dissémination de noyaux de condensation demeurant infectieux longtemps et sur de longues distances (> 1 m), lorsqu'ils sont en suspension dans l'air. On distingue la transmission aérienne systématique et la transmission aérienne préférentielle. La transmission aérienne systématique concerne les agents pathogènes transmis uniquement par dépôt de noyaux de condensation en conditions naturelles. La transmission aérienne préférentielle concerne les agents pathogènes dont la transmission peut emprunter de multiples voies mais qui sont transmis principalement par des noyaux de condensation.	Tuberculose pulmonaire, rougeole, varicelle
Aérienne opportuniste	Transmission de noyaux de condensation à faible distance, dans des circonstances particulières telles que la réalisation de procédures générant des aérosols associées à la transmission d'agents pathogènes.	Coronavirus du SRAS, grippe
Gouttelettes	Les gouttelettes sont générées par une personne (source) infectée lorsqu'elle tousse, éternue ou parle. La transmission survient lorsque ces gouttelettes contenant des micro-organismes sont projetées à faible distance (généralement < 1 m).	Adénovirus, virus respiratoire syncytial, grippe, coronavirus du SRAS

SRAS, syndrome respiratoire aigu sévère

Les études finalement sélectionnées ($n = 65$) (voir leur liste à l'annexe A) ont été incluses en raison d'une relation entre le taux de ventilation ou la direction du flux d'air et la propagation de certaines maladies infectieuses. Les maladies pour lesquelles on observait une relation possible entre la transmission chez l'homme et la ventilation étaient la varicelle (Gustafson et al., 1982), la rougeole (Bloch et al., 1985), la variole (Wehrle et al., 1970) et la tuberculose pulmonaire (TB) (Hutton et al., 1990 ; Calder et al., 1991 ; Menzies et al., 2000). Dans le présent guide, le terme de maladies à transmission aérienne fait référence à ces quatre maladies.

La revue systématique a fourni cinq résultats majeurs :

- L'absence de ventilation ou des taux de ventilation faibles sont associés à des taux d'infection accrus ou à des flambées de maladies à transmission aérienne.
- Des taux de ventilation élevés pourraient réduire le risque d'infection. Dans le cas de chambres non conçues pour l'isolement, les taux de ventilation inférieurs à 2 RAH (soit 13 l/s pour une chambre de $4 \times 2 \times 3 \text{ m}^3$) sont associés à des taux de conversion plus élevés du test cutané à la tuberculine chez le personnel. Un taux de ventilation plus élevé assure une meilleure dilution, et réduit en conséquence le risque d'infection à transmission aérienne. C'est pourquoi les zones bien ventilées présentent un moindre risque de transmission de la tuberculose et d'autres infections à transmission aérienne. L'annexe D fournit plus de précisions sur la réduction de la transmission liée au taux de ventilation.

- Il n'existe pas de données relatives à l'impact du taux de ventilation sur la transmission des maladies transmises par des gouttelettes. Ce point concorde avec les données physiques relatives à la transmission par gouttelettes, qui montrent que la ventilation générale ne devrait pas affecter la transmission par des gouttelettes de grande taille.
- Un flux d'air provenant d'une source contaminée peut provoquer une infection à distance de la source. Le taux d'infection (ou d'attaque) diminue lorsque la distance physique par rapport à la source augmente. L'une des conditions essentielles, pour la survenue d'infections induites par un flux d'air, est que la concentration d'agent pathogène aéroporté soit suffisamment élevée à la source (du fait de l'intensité de la source ou d'un faible taux de ventilation).
- Bien que les données soient insuffisantes pour l'établir, il semble qu'un flux d'air provenant d'une source contaminée ne provoque pas d'infection si la dilution est suffisante. Il n'existe pas d'indication précise sur la dilution minimale requise.

Après plus de 100 années d'étude des relations entre ventilation et infection, on ne dispose que de données éparses et incomplètes. Elles permettent néanmoins d'estimer les exigences minimales de ventilation applicables aux chambres d'isolement, ainsi qu'aux zones de l'hôpital non conçues pour l'isolement, pour prévenir la propagation d'infections à transmission aérienne. Les données disponibles sont également suffisantes pour estimer les exigences minimales de ventilation applicables aux écoles, bureaux et autres bâtiments non hospitaliers pour prévenir la propagation d'infections à transmission aérienne.

3.2 Exigences de ventilation applicables pour la lutte contre les infections à transmission aérienne

L'une des principales difficultés, lors de l'établissement de directives de ventilation pour la lutte contre l'infection, est l'absence de données suffisantes pour recommander un débit de ventilation minimal permettant de lutter contre l'infection par des noyaux de condensation. La ventilation permet de réduire la concentration d'agents pathogènes aéroportés en évacuant ou en diluant les noyaux de condensation présents dans l'air. L'augmentation du débit de ventilation permet d'accroître la capacité de dilution et, potentiellement, de réduire en conséquence le risque d'infection transmise par voie aérienne. Conformément à cette hypothèse, Menzies et al. (2000) ont observé que la conversion du test à la tuberculine était significativement plus rapide et plus fréquente chez le personnel clinique travaillant dans des zones où le taux moyen de ventilation était inférieur à 2 RAH. Un taux de ventilation élevé permet de diluer l'air contaminé présent dans un espace donné plus rapidement qu'un taux de ventilation faible, et peut également réduire le risque de transmission de noyaux de condensation infectieux aux individus présents dans cet espace. Cependant, on ne connaît pas le taux de ventilation maximal (au-delà duquel le risque d'infection ne diminue plus). Le choix d'un débit de ventilation minimal peut être influencé par la nécessité de réduire la consommation d'énergie (un débit de ventilation élevé correspondant à des dépenses énergétiques accrues dans le cas de la ventilation mécanique).

La démarche adoptée dans le présent guide pour déterminer le taux de ventilation minimal requis repose principalement sur deux éléments (voir l'annexe E) :

- l'effet du taux de ventilation sur la décroissance de la concentration de noyaux de condensation ; et
- la modélisation mathématique du risque par l'équation de Wells-Riley, permettant d'estimer l'effet du débit de ventilation sur le risque de transmission d'infections aéroportées connues.

Les principes sous-jacents sont que plus le taux de ventilation est élevé, plus les particules (noyaux de condensation, notamment) sont éliminées rapidement de l'atmosphère. Ainsi, selon l'équation de Wells-Riley, la probabilité d'infection par des noyaux de condensation infectieux est inversement corrélée au débit de ventilation. Les paramètres utilisés dans l'équation de Wells-Riley sont notamment le débit de ventilation, le débit de génération de noyaux de condensation par la source (quanta/minute) et la durée d'exposition :

$$P = \frac{D}{S} = 1 - \exp\left(-\frac{Ipqt}{Q}\right)$$

où :

P = probabilité d'infection pour les sujets sensibles

D = nombre de cas de maladie

S = nombre de sujets sensibles

I = nombre de sujets infectants

p = débit respiratoire par personne (m^3/s)

q = débit de génération de quanta par une personne infectée (quanta/s)

t = durée totale d'exposition (s)

Q = débit d'admission d'air extérieur (m^3/s).

Sur la base de ce modèle, dans des situations de forte production de quanta (procédures à haut risque, générant des aérosols par exemple), la probabilité d'infection pour 15 minutes d'exposition dans une pièce où le RAH est de 12 est estimée à moins de 5 % (voir l'annexe E pour plus de précisions).

Lorsque les performances de la ventilation sont mesurées par le RAH, le volume de la zone ventilée est naturellement un paramètre important. Un RAH donné correspond à un débit d'air (m^3/h ou l/s) plus élevé dans une pièce de grand volume que dans une pièce de petit volume.

Certaines directives de conception des chambres d'isolement ventilées mécaniquement (CDC, 2003) prévoient le maintien d'un niveau minimal de pression négative et d'un taux minimal de ventilation ≥ 12 RAH. On a vu qu'un inconvénient majeur de la ventilation naturelle est la difficulté à maintenir constante la direction du flux d'air, sujette à d'importantes variations. Il est difficile d'assurer une pression négative par la ventilation naturelle, mais si la dilution de l'air est suffisante, l'air rejeté à l'air libre présente un risque minimal.

Cependant, l'emplacement des zones de précautions aériennes et le placement des patients au sein de ces zones doivent être optimisés, afin que le risque d'infection soit aussi réduit que possible pour les personnes présentes dans les zones voisines.

Sur la base de ce qui précède, l'Organisation mondiale de la Santé formule les recommandations du point 3.3 ci-après.

3.3 Recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé relatives aux exigences en matière de ventilation

Pour le classement global de chaque recommandation en recommandation stricte ou recommandation conditionnelle, on se reportera aux explications des tableaux de l'annexe B.

1. Pour contribuer à prévenir les infections à transmission aérienne, une ventilation adéquate est nécessaire dans toutes les zones de soins des établissements de soins (Gustafson et al., 1982 ; Bloch et al., 1985 ; Hutton et al., 1990 ; Calder et al., 1991).

Recommandation stricte

Commentaires : Il existe peu de données probantes indiquant qu'une ventilation insuffisante soit associée à un risque d'infection accru et plaidant pour l'utilisation de la ventilation dans la lutte contre les infections à transmission aérienne.

2. Pour la ventilation naturelle, les débits de ventilation minimaux suivants doivent être assurés, en valeurs moyennes sur une heure :
 - 160 l/s/patient (débit de ventilation moyen sur une heure) pour les chambres de précautions aériennes (avec un minimum de 80 l/s/patient) (attention : cette exigence ne s'applique qu'aux installations neuves ou aux rénovations de grande ampleur) ;
 - 60 l/s/patient pour les chambres à usage général et les services de consultation externe ;
 - 2,5 l/s/m³ pour les couloirs et autres lieux de passages ne comportant pas un nombre prédéterminé de patients ; toutefois, si des soins doivent être prodigués dans des couloirs, en situation d'urgence par exemple, les débits de ventilation doivent être les mêmes que ceux exigés pour les chambres de précautions aériennes ou les chambres à usage général.

La conception doit tenir compte des variations du débit de ventilation.

Lorsque la ventilation naturelle ne permet pas à elle seule de satisfaire aux exigences de ventilation, il faut envisager d'autres systèmes de ventilation, comme les systèmes de ventilation naturelle hybride (ou mixte) et, si cela ne suffit pas, avoir recours à la ventilation mécanique.

Recommandation conditionnelle

Commentaires : Pour que la ventilation naturelle soit applicable, il faut que les conditions climatiques soient favorables.

3. Lors de la conception d'établissements de soins ventilés naturellement, il faut veiller à ce que le flux d'air général amène l'air des sources d'agents vers des zones où la dilution est suffisante, et de préférence vers l'extérieur (Gustafson et al., 1982 ; Bloch et al., 1985 ; Hutton et al. 1990 ; Calder et al. 1991).

Recommandation conditionnelle

Commentaires : Bien que certaines données probantes indiquent une relation possible entre la direction du flux d'air et la propagation d'infections à transmission aérienne, ce phénomène a été observé pour des taux de ventilation extrêmement faibles (inférieurs à 4 RAH) (Bloch et al., 1985). On fait l'hypothèse que si le taux de ventilation est suffisamment élevé dans les espaces voisins, le risque devrait être très faible, voire minimal (le même qu'en plein air, par exemple). Cependant, le taux de ventilation requis dans les espaces clos voisins des chambres de précautions aériennes pour réduire le risque de propagation n'est pas connu avec précision. Pour que la ventilation naturelle soit applicable, il faut que les conditions climatiques soient favorables.

4. Dans les espaces où sont réalisées des procédures générant des aérosols associées à la transmission d'agents pathogènes, les exigences relatives à la ventilation naturelle doivent correspondre au minimum à la recommandation 2. S'il s'agit d'agents aéroportés, les recommandations 2 et 3 doivent être appliquées.

Recommandation conditionnelle

Commentaires : Des données indirectes montrent que certaines procédures générant des aérosols sont associées à un risque d'infection accru. Il est possible que la ventilation joue un rôle, mais les exigences minimales en matière de ventilation dans le cas des procédures générant des aérosols doivent faire l'objet d'études complémentaires.

3.3.1 Explication des recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé

On reconnaît, dans ce guide, la faiblesse des données épidémiologiques disponibles sur la relation entre débit de ventilation et infections à transmission aérienne, mais l'importance de la ventilation est appréciée ici tant d'un point de vue théorique que sur la base des pratiques actuelles en matière d'isolement.

Le guide prend également acte des trois inconvénients majeurs de la ventilation naturelle : variation du débit de ventilation due à la variabilité des forces motrices, difficulté à assurer une direction d'écoulement de l'air constante et une température intérieure confortable sous les climats extrêmes.

Bien que des recherches restent nécessaires sur les effets du taux de ventilation sur le risque infectieux, le taux de ventilation mécanique actuellement recommandé pour les chambres d'isolement aérien, soit ≥ 12 RAH (CDC, 2003, 2005), est adopté comme référence. Des démarches applicables (sans être étayées par des données probantes) pour déterminer le débit de ventilation minimal requis sont exposées à l'annexe E. Nous suggérons en outre que, si la ventilation naturelle est utilisée pour lutter contre l'infection, le débit de ventilation doit être plus élevé qu'il n'est exigé dans le cas de la ventilation mécanique, pour compenser les variations prévisibles du débit de ventilation et les difficultés à contrôler la direction du flux d'air.

Le guide suggère d'utiliser le volume de la pièce et le débit de ventilation (en litres par seconde par patient, l/s/patient, ou l/s/p) de préférence au taux de renouvellement d'air (RAH), bien que celui-ci soit communément utilisé dans d'autres directives. L'utilisation du débit de ventilation (l/s/patient) repose sur le lien direct entre le niveau d'exposition et le débit de ventilation, ainsi que sur la relation directe avec le nombre de patients que l'espace est destiné à recevoir. Toutefois, pour les couloirs et autres espaces non conçus pour un nombre donné de patients, le débit de ventilation est fondé sur le volume de l'espace.

D'autres documents recommandent 12 RAH pour une chambre de précautions aériennes, ce qui équivaut à 80 l/s/patient dans une chambre de 4×2×3 m³, par exemple. Le présent guide recommande de doubler ce débit de ventilation pour les chambres de précautions aériennes à ventilation naturelle. Pour une chambre du volume indiqué, par conséquent, un débit de ventilation de 160 l/s/patient est recommandé, en moyenne horaire. De plus, le guide recommande également un débit de ventilation minimal de 80 l/s/patient à chaque instant.

L'annexe B indique les facteurs pris en compte dans le classement des différentes recommandations.

3.3.2 Révision et évaluation des recommandations

Les exigences des recommandations pour la ventilation naturelle dans le cadre de la lutte contre les infections devront être revues et actualisées lorsque de nouvelles données sur l'impact de la ventilation seront disponibles.

Ces recommandations ont été élaborées par le tableau d'experts externe chargé de la revue systématique, qui a utilisé le système d'évaluation GRADE lors de sa réunion de novembre 2008 à Genève (voir l'annexe B).

La recommandation 1 est fondée principalement sur les études de Gustafson et al. (1982) (varicelle), Bloch et al. (1985) (rougeole), Hutton et al. (1990) (TB) et Calder et al. (1991) (TB). Ces études fournissent des données établissant la preuve d'une relation entre ventilation et propagation de certaines maladies infectieuses. L'absence de ventilation, ou de faibles débits de ventilation, étaient associés à des taux d'infection accrus ou à des flambées épidémiques, tant pour la transmission aérienne que pour la transmission aérienne opportuniste.

La recommandation 2 est fondée principalement sur les études de Menzies et al. (2000) et Bloch et al. (1985), qui fournissent des données établissant la preuve d'une relation entre un faible taux de ventilation (inférieur à 2 RAH) et la propagation de la tuberculose (Menzies et al., 2000) et de la rougeole (Bloch et al., 1985). Ces études suggèrent une relation entre la direction du flux d'air et la propagation de maladies infectieuses transmises par voie aérienne.

Pour la recommandation 4, aucune étude fournissant des données probantes sur une relation entre les caractéristiques de la ventilation et les infections dues à des procédures générant des aérosols n'a été trouvée. Cependant, il existe des données établissant indirectement que certaines procédures générant des aérosols sont associées à un risque d'infection accru.

3.4 Résumé

Des systèmes de ventilation générale bien conçus peuvent jouer un rôle important dans la prévention de la propagation d'infections. Les patients atteints de maladies infectieuses se propageant facilement par voie aérienne (varicelle, rougeole, tuberculose, par exemple) doivent être placés en chambres de précautions aériennes. Cependant, il y a souvent un délai entre l'admission de ces patients dans l'établissement de soins et le diagnostic de la pathologie infectieuse. La maladie peut se transmettre à d'autres patients ou au personnel pendant que ces patients attendent dans des espaces communs (salle d'attente, service des urgences, par exemple). Accorder plus d'attention aux exigences de ventilation dans ces espaces communs non isolés pourrait se traduire par des progrès significatifs dans la lutte contre l'infection.

En tout état de cause, les stratégies de prévention et de lutte contre les maladies passent par l'évaluation des risques et des ressources, puis par le recours à des mesures administratives, des mesures environnementales et techniques, et des EPI appropriés, parallèlement à la mise en œuvre d'un système de ventilation adapté.

2^e partie — Conception de la ventilation naturelle

On trouvera dans cette deuxième partie une introduction aux principes fondamentaux de conception de la ventilation naturelle dans le cadre de la lutte contre l'infection. Le présent guide, qui se limite aux principes fondamentaux de conception, sera suivi d'un projet de l'Organisation mondiale de la Santé destiné à développer ces principes.

Ce projet, qui s'appuiera sur la présente introduction, vise principalement à fournir les éléments nécessaires à une adaptation des établissements de soins à la ventilation naturelle, et à optimiser ainsi la préparation aux épidémies tout en réduisant les coûts et les émissions. Il repose sur l'idée qu'un guide de conception claire et bien conçu peut être utile aux autorités sanitaires, en particulier dans les pays à bas niveau de revenus. Ce guide sera téléchargeable gratuitement. Grâce à cet outil d'assistance à la conception, un investissement modéré en moyens financiers et en personnel peut permettre des avancées considérables dans des domaines d'une importance cruciale.

Rappelons que la qualité de la conception est déterminante pour le bon fonctionnement des établissements de soins ou des chambres de précautions aériennes ventilés naturellement.

4 Comprendre la ventilation naturelle

4.1 Les forces motrices de la ventilation naturelle

Trois types de forces peuvent assurer le mouvement de l'air dans les bâtiments :

- la pression du vent
- l'effet dit « de cheminée » (tirage)
- des forces mécaniques.

On traitera ici des deux premiers types de forces. La ventilation naturelle a pour moteur des forces naturelles, alors que la ventilation mécanique est assurée par des dispositifs mécaniques de soufflage et d'extraction. Forces mécaniques et forces naturelles peuvent être combinées dans un système de ventilation hybride, ou mixte.

4.1.1 La pression du vent

L'action du vent sur un bâtiment induit une pression positive sur la façade au vent et une pression négative sur la façade sous le vent. Cette différence de pression fait circuler l'air des ouvertures du bâtiment exposées au vent vers celles situées sous le vent (figure 4.1). Il est possible d'estimer ces pressions dans le cas de bâtiments simples. La circulation de l'air autour des bâtiments est complexe et fait l'objet de nombreux manuels (Aynsley, Melbourne & Vickery (1977), Liu (1991), par exemple).

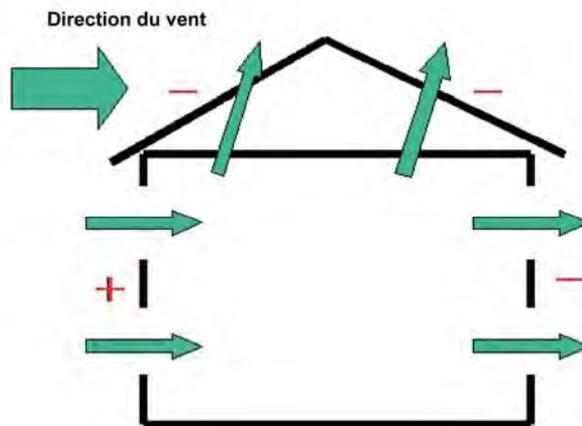


Figure 4.1 Direction des flux d'air induits par le vent dans un bâtiment

En cas de ventilation unilatérale de pièces hermétiquement closes par ailleurs, ce ne sont pas les pressions moyennes du vent qui jouent, mais seulement les fluctuations de pression (figure 4.2). Etheridge & Sandberg (1996) ont étudié ces fluctuations. Ce mode de ventilation est courant ; avec le temps, cependant, il se crée des fuites significatives autour des portes et des autres points d'accès à la pièce. On retiendra que le simple fait d'ouvrir une fenêtre ne permet pas nécessairement d'assurer un taux de renouvellement d'air (RAH) suffisant.

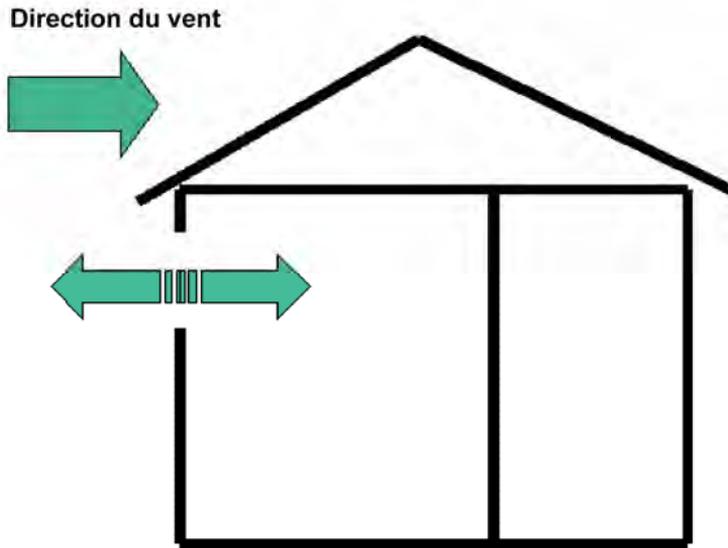


Figure 4.2 Ventilation unilatérale générée par les fluctuations de pression

La pression exercée par le vent à la surface d'un bâtiment est exprimée comme la différence entre la pression totale s'exerçant en un point et la pression atmosphérique statique. Les données relatives à la pression du vent sont généralement obtenues en soufflerie, en utilisant des maquettes des bâtiments. Pour une forme de bâtiment, des conditions environnantes et une direction du vent données, la pression du vent varie proportionnellement au carré de la vitesse du vent à l'extérieur du bâtiment. La pression du vent est généralement normalisée, c'est-à-dire divisée par la pression dynamique de la vitesse du vent. La pression de vent normalisée, appelée coefficient de pression du vent, a pour symbole C_p . La vitesse du vent est généralement mesurée en soufflerie à la hauteur de l'avant-toit du bâtiment :

$$C_p = \frac{P_T - P_{AS}}{\frac{1}{2} \rho V_H^2}$$

où :

C_p = coefficient de pression du vent (-)

P_T = pression totale (Pa)

P_{AS} = pression atmosphérique statique en haut du bâtiment (Pa)

ρ = masse volumique de l'air (kg/m^3)

V_H = vitesse du vent, à distance des influences de l'environnement, en haut du bâtiment (m/s).

4.1.2 Le tirage

Le tirage est généré par la différence de température ou d'humidité (parfois exprimée sous forme de différence de densité) entre l'air intérieur et l'air extérieur. Cette différence crée un déséquilibre dans les gradients de pression des colonnes d'air intérieure et extérieure, entraînant une différence de pression verticale.

Lorsque l'air intérieur est plus chaud que l'air extérieur, l'air intérieur est moins dense et s'élève. De l'air pénètre dans le bâtiment par ses ouvertures basses et s'échappe par ses ouvertures hautes.

La direction du flux s'inverse, dans une certaine mesure, lorsque l'air intérieur est plus froid que l'air extérieur ; l'air intérieur est plus dense que l'air extérieur. De l'air entre dans le bâtiment par ses ouvertures hautes et s'échappe par ses ouvertures basses.

Les flux générés par le tirage, dans un bâtiment, sont fonction des températures intérieure et extérieure. Le débit de ventilation à travers une cheminée est fonction du gradient de pression entre les deux ouvertures de la cheminée.

Le gradient de pression peut être calculé comme suit :

$$\Delta P_s = (\rho_o - \rho_i)gH = \rho_o gH \frac{T_i - T_o}{T_o}$$

où :

P_s = pression de tirage (Pa)

ρ_o = masse volumique de l'air extérieur (kg/m^3)

ρ_i = masse volumique de l'air intérieur (kg/m^3)

g = accélération gravitationnelle ($9,8 \text{ m/s}^2$)

H = hauteur entre deux ouvertures (m)

T_i = température de l'air intérieur ($^{\circ}\text{K}$)

T_o = température de l'air extérieur ($^{\circ}\text{K}$).

4.2 Débit de ventilation

Selon une règle empirique, le taux et le débit de ventilation naturelle due au vent dans une pièce présentant deux ouvertures opposées (une fenêtre et une porte, par exemple) peuvent être calculés comme suit :

$$\text{RAH} = \frac{0,65 \times \text{vitesse du vent (m/s)} \times \text{surface de la plus petite ouverture (m}^2\text{)} \times 3600 \text{ s/h}}{\text{volume de la pièce (m}^3\text{)}}$$

$$\text{Débit de ventilation (l/s)} = 0,65 \times \text{vitesse du vent (m/s)} \times \text{surface de la plus petite ouverture (m}^2\text{)} \times 1000 \text{ l/m}^3$$

Le tableau 4.1 donne des valeurs estimées du taux RAH et du débit de ventilation dus à la seule force du vent, pour une vitesse du vent de 1 m/s, dans l'hypothèse d'une salle de 7 m (longueur) \times 6 m (largeur) \times 3 m (hauteur), avec une fenêtre de $1,5 \times 2 \text{ m}^2$ et une porte de $1 \times 2 \text{ m}^2$ (plus petite ouverture).

Tableau 4.1 Taux et débit de ventilation estimés pour une salle de 7 m \times 6 m \times 3 m

Ouvertures	RAH	Débit de ventilation (l/s)
Fenêtre ouverte (100%) + porte ouverte	37	1300
Fenêtre ouverte (50%) + porte ouverte	28	975
Fenêtre ouverte (100%) + porte fermée	4,2	150

La vitesse du vent est la valeur mesurée à la hauteur du sommet du bâtiment, en un lieu suffisamment éloigné du bâtiment et non obstrué (sur un aéroport, par exemple).

Pour la ventilation naturelle par tirage, le taux RAH peut être calculé comme suit :

Renouvellements d' air par heure (RAH) =

$$\frac{0,15 \times \text{surface de la plus petite ouverture (m}^2) \times 3600 \text{ s/h} \times \sqrt{(\text{température intérieure} - \text{extérieure (}^\circ\text{K)}) \times \text{hauteur de tirage (m)}}}{\text{volume de la pièce (m}^3)}$$

Débit de ventilation (l/s) =

$$0,15 \times 1000 \text{ l/m}^3 \times \text{surface de la plus petite ouverture (m}^2) \times \sqrt{(\text{température intérieure} - \text{extérieure (}^\circ\text{K)}) \times \text{hauteur de tirage (m)}}$$

Il existe des outils de conception avancée pour l'analyse de la ventilation et le dimensionnement des ouvertures (CIBSE, 2005).

4.3 Résumé

Pour concevoir un système de ventilation exclusivement naturelle, il faut comprendre les principales forces motrices de la ventilation naturelle — la pression du vent et le tirage. Ces forces commandent l'entrée de l'air et son déplacement dans un bâtiment, et peuvent être combinées en fonction des besoins pour concevoir un système optimal de ventilation naturelle.

5 Conception et exploitation

5.1 Modes de ventilation naturelle et de ventilation hybride

Ce chapitre décrit les principaux modes de ventilation naturelle et de ventilation hybride (mixte).

5.1.1 Systèmes de ventilation naturelle

On a vu que la ventilation naturelle consiste à utiliser des forces naturelles pour introduire et distribuer l'air extérieur dans un bâtiment et faire sortir l'air du bâtiment. Ces forces naturelles sont la pression du vent ou la pression résultant de la différence de masse volumique entre l'air intérieur et l'air extérieur.

Il existe quatre modes de conception des systèmes de ventilation naturelle :

- *flux traversant* (pas de couloir) — le système de ventilation naturelle le plus simple, ne comportant aucun obstacle entre l'entrée et la sortie du vent dominant (avec des fenêtres de taille et de géométrie similaires ouvertes sur des façades opposées du bâtiment) ;
- *tour à vent* (système de captage/extraction) — le côté de la tour en pression positive a une fonction de captage de l'air et le côté en pression négative une fonction d'extraction ;
- *cheminée* (tirage), extraction simple— cheminée verticale partant de chaque pièce, sans aucune interconnexion, et sortant en toiture ; ce système assure un mouvement de l'air fondé sur les gradients de densité ; et
- *cheminée* (tirage), atrium solaire — large cheminée chauffée par le rayonnement solaire, qui induit un mouvement d'air dû aux gradients de densité (de température) ; en l'absence de rayonnement solaire, l'atrium n'assure qu'une ventilation minimale.

5.1.2 Systèmes de ventilation hybride (mixte)

La ventilation hybride (mixte) repose, comme on l'a vu, sur des forces motrices naturelles pour assurer le débit d'air requis (valeur de consigne). Elle utilise la ventilation mécanique lorsque le débit d'air est trop faible pour produire une ventilation naturelle.

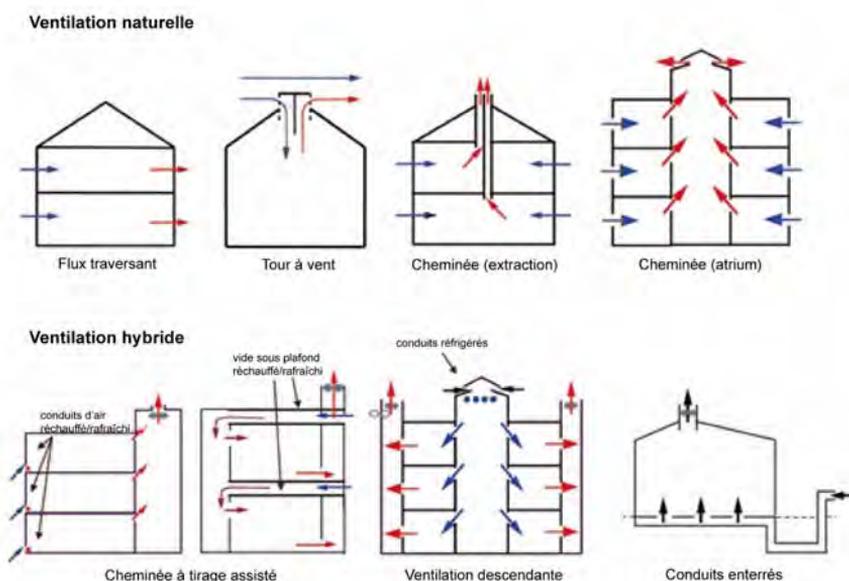
Il existe trois modes de conception des systèmes de ventilation hybrides.

- *Cheminée à tirage assisté* — lorsque la cheminée ne bénéficie pas d'un rayonnement solaire suffisant (le soir et les jours de mauvais temps), le débit de ventilation est augmenté grâce à des extracteurs d'air. L'air entrant est réchauffé ou rafraîchi pour maintenir le confort des occupants.
- *Ventilation descendante* (cheminée à tirage assisté plus tour à vent) — lorsque la cheminée ne bénéficie pas d'un rayonnement solaire suffisant (le soir et les jours de mauvais temps), le débit d'extraction est complété grâce à des extracteurs d'air, et le

débit d'admission est complété grâce à la tour à vent (dispositif de captage). L'air entrant est réchauffé ou rafraîchi pour maintenir le confort des occupants.

- *Conduits enterrés* — lorsque le terrain est suffisamment grand, un réseau de conduits de ventilation enterrés permet de réchauffer ou de rafraîchir l'air extérieur, qui doit y séjourner suffisamment longtemps pour que sa température approche la température d'équilibre du sous-sol. Ce système n'est pas idéal lorsqu'il faut assurer un haut débit de ventilation.

La figure 5.1 illustre les différents systèmes de ventilation naturelle et hybride.



Source : avec l'aimable autorisation du professeur Martin Liddament, VEETECH, Coventry, Royaume-Uni.

Figure 5.1 Différents systèmes de ventilation naturelle et hybride

5.2 Principes généraux de conception de la ventilation naturelle

La démarche de conception d'un bâtiment ventilé naturellement à des fins de lutte contre les infections comprend trois grandes étapes, décrites en détails au point 5.4.

1. Etablissement du schéma de circulation d'air souhaité, des ouvertures d'entrée aux ouvertures de sortie de l'air.
2. Identification des principales forces motrices disponibles pour obtenir la circulation d'air recherchée.
3. Détermination des dimensions et de l'emplacement des ouvertures de telle sorte que les débits de ventilation requis puissent être assurés quel que soit le régime d'exploitation.

La procédure adoptée pour la ventilation naturelle commence généralement par la conception architecturale, l'agencement du système, le choix de ses composantes, le dimensionnement des orifices de ventilation et la stratégie de régulation. Elle se conclut par la réalisation d'un schéma détaillé du système.

L'adaptation d'un bâtiment existant ou la conception d'un bâtiment neuf dans l'optique de la lutte contre les infections à transmission aérienne par la ventilation naturelle comprend, en principe, l'implantation de chambres d'isolement individuelles équipées de fenêtres ouvrables et de cabinets de toilette attenants. Cependant, lorsque les ressources sont limitées, on peut être contraint de réduire le nombre de chambres d'isolement, et de prévoir des solutions d'isolement collectives d'appoint en cas de besoin (tentes d'isolement installées à l'extérieur, par exemple, et ouvertes au vent).

Le besoin se fait sentir de solutions techniques efficaces et adaptées et de conceptions architecturales innovantes, pour que la ventilation naturelle puisse être utilisée plus largement dans le monde, dans des contextes climatiques divers.

Lorsque la direction et la vitesse moyenne du vent dominant peuvent être mises à profit, dans des bâtiments où la ventilation naturelle doit contribuer à la lutte contre les infections (à la différence d'autres types de bâtiments), la conception doit prendre en compte le cas le plus défavorable — à savoir l'absence de vent imposant éventuellement la mise en œuvre d'une ventilation mécanique d'appoint.

5.3 Considérations climatiques et autres facteurs intervenant dans la conception de la ventilation

Une série de facteurs doivent être pris en compte lors de la conception d'un bâtiment utilisant la ventilation naturelle pour la lutte contre l'infection.

Des taux de renouvellement d'air élevés sont nécessaires lorsque la lutte contre l'infection est l'objectif principal dans la conception du bâtiment. L'impact d'un taux de renouvellement d'air élevé sur les conditions environnementales d'ensemble à l'intérieur du bâtiment doit être pris en compte, en particulier pour ce qui est du confort thermique, de la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment et de la sécurité incendie. D'autres facteurs d'ambiance défavorables *a priori*, comme le bruit et la pollution de l'air, et leur impact sur la qualité de l'environnement doivent être évalués en amont de la conception. Sous les climats froids, les impératifs de chauffage peuvent être difficiles à concilier avec les taux de ventilation élevés requis pour la lutte contre les infections. Sous les climats chauds et humides, la condensation de l'humidité à l'intérieur des chambres lors des intersaisons peut rendre les lits et les sols humides, provoquer un écoulement d'eau du plafond et favoriser le développement de moisissures — créant ainsi des conditions inconfortables et malsaines. Or l'aménagement de larges ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment favorise l'entrée d'insectes, d'animaux et d'autres intrus, et peut créer des problèmes de sécurité et de lutte contre les affections à transmission vectorielle.

5.3.1 Confort thermique

Sous les climats tempérés et chauds, lorsque la qualité de l'air ambiant est satisfaisante, un taux de ventilation élevé est bénéfique à la fois pour le confort thermique et la qualité de l'air intérieur. Ce n'est pas le cas sous les climats froids, où l'infiltration d'air extérieur doit être réduite pour assurer le confort thermique. Lorsque la température de l'air ambiant reste durablement supérieure à 30 °C, l'ambiance thermique peut devenir insupportable dans une chambre ventilée naturellement. Dans un immeuble ventilé naturellement, il faut donc accorder une plus grande attention à la conception de l'architecture et de l'enveloppe que dans un immeuble ventilé mécaniquement, pour que le confort thermique soit acceptable à l'intérieur du bâtiment. Le choix des fenêtres, la création d'ombrages extérieurs, l'isolement de l'enveloppe et les propriétés d'absorption solaire et de rayonnement thermique des matériaux de façade jouent un rôle important à cet égard. Le concepteur doit comprendre que la conception finale est un compromis entre les contraintes contradictoires des saisons chaudes et froides. Des outils de simulation des performances thermiques peuvent être utilisés pour l'évaluation quantitative et la comparaison de différentes options de conception. On trouvera des explications plus détaillées sur les options techniques et les méthodes de simulation dans les documents de l'ASHRAE (2009).

5.3.2 Contraintes liées aux fortes chaleurs

Conception des bâtiments

Lorsque la surface du terrain est suffisante, l'utilisation active du rayonnement terrestre ascendant permet de réduire notablement la température radiante effective. Une conception architecturale semi-ouverte est préférable, pour laisser place au rayonnement terrestre (ascendant) de grande longueur d'onde. La semi-ouverture doit être disposée du côté ombragé du bâtiment, pour éviter l'exposition directe au rayonnement solaire — c'est le principe du brise-soleil (figure 5.2).

L'apport de chaleur solaire doit être réduit à un minimum par l'utilisation de systèmes d'ombrage extérieur adaptés ou de vitrages perfectionnés. Les effets de tirage liés à la chaleur du soleil sur le flux d'air peuvent être mis à profit pour amener l'air chaud vers les niveaux supérieurs du bâtiment, ce qui présente en outre l'avantage d'être conforme aux schémas d'écoulement recherchés pour la lutte contre l'infection.

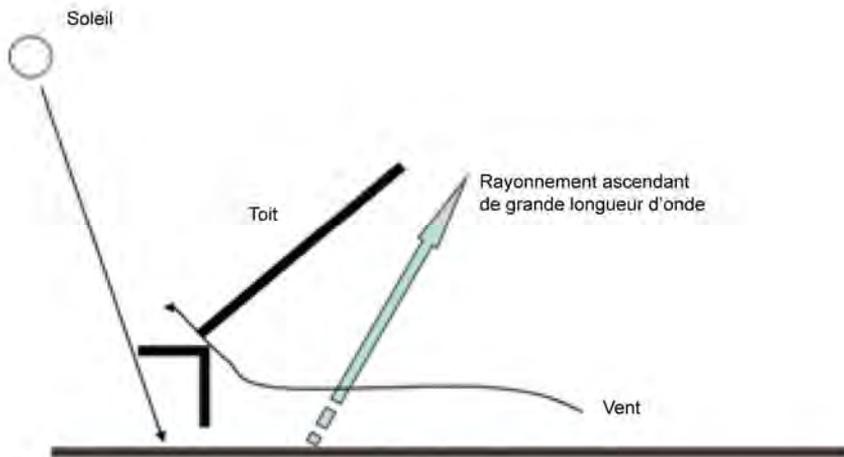


Figure 5.2 Une conception semi-ouverte laissant place au rayonnement thermique terrestre de grande longueur d'onde peut améliorer notablement le confort thermique en été

Refroidissement mécanique à faible coût énergétique

Un taux de renouvellement d'air élevé peut être favorable pour le confort thermique par temps frais, mais créer une ambiance inconfortable les jours de forte chaleur humide et sans vent. Lorsque le vent est faible, le renouvellement d'air lié au tirage ne crée pas toujours un mouvement d'air suffisant à l'intérieur des bâtiments.

Refroidissement par ventilateurs

Outre les systèmes de ventilation hybrides (mixtes), des ventilateurs électriques permettent d'améliorer le mouvement de l'air — bien que la création d'une « brise » artificielle n'augmente pas nécessairement le taux de renouvellement d'air.

L'ASHRAE (2009) a élaboré des guides de conception faisant appel au modèle largement reconnu du vote moyen prédit (PMV, pour « predicted mean vote »), qui tient compte de la température de l'air, de la température radiante, de la vitesse de l'air, du degré d'habillement et du niveau d'activité des personnes. Les concepteurs peuvent utiliser le modèle PMV pour estimer l'augmentation de la vitesse de l'air requise lorsqu'il fait chaud. Si la température est inférieure à 30 °C, un confort thermique acceptable peut être obtenu en augmentant la vitesse de l'air (Xia et al., 2000). Des températures supérieures à 30 °C créent inévitablement un stress thermique chez les occupants d'un bâtiment.

Il faut utiliser des ventilateurs à vitesse réglable, et les occupants doivent pouvoir régler eux-mêmes la vitesse. Ce mode de refroidissement réduit considérablement la consommation d'énergie, par rapport au conditionnement d'air.

Les jours les plus chauds, lorsque la température de l'air dépasse 30 °C, l'utilisation de ventilateurs ne rafraîchit pas suffisamment les bâtiments pour le confort des occupants. On peut alors utiliser une méthode de refroidissement par évaporation, peu coûteuse et

particulièrement adaptée si le taux de renouvellement d'air est élevé. Cette stratégie est relativement peu coûteuse, comparée à un système de conditionnement d'air (Zhang et al., 2000).

5.3.3 Contraintes liées au froid

Par temps froid, un taux de renouvellement d'air élevé n'est pas souhaitable, pour le confort thermique, d'autant que les fenêtres sont généralement fermées pour garder la chaleur. Même si un chauffage classique est mis en place, les effets en sont souvent insignifiants si le taux de renouvellement d'air est élevé, et le rendement énergétique risque d'être faible. Les stratégies de chauffage doivent donc être mûrement réfléchies. L'enveloppe du bâtiment doit être conçue de façon à capter la chaleur du soleil et à réduire les pertes par conduction à travers les murs. Une isolation appropriée des murs et l'utilisation de double vitrage sont souhaitables. En conditions de froid extrême, une évaluation rigoureuse faisant appel aux techniques de simulation doit être réalisée, afin que le niveau de froid puisse être quantifié. Il est possible, sur ces bases, de déterminer si la ventilation naturelle est la stratégie à adopter dans les conditions climatiques considérées.

Lorsqu'une stratégie de chauffage active est envisagée, les méthodes de chauffage radiant ciblé ou de chauffage direct, près du corps, sont plus efficaces et sont préférées pour deux raisons. Tout d'abord, du fait des effets de tirage, l'air chaud provenant des radiateurs à convection classiques tend à s'accumuler en partie haute des locaux. Ensuite, lorsque le taux de renouvellement d'air est élevé, la perte de chaleur est considérable. Il est facile de se procurer des radiateurs électriques radiants modernes, qui constituent une meilleure option que les autres types de radiateurs électriques courants.

Il existe aussi des matelas électriques chauffants, qui consomment généralement de 50 à 100 watts. Ils sont efficaces pour les patients alités, qui peuvent ainsi supporter des températures beaucoup plus basses liées à un taux de renouvellement d'air élevé. Ils permettent en outre d'éviter les consommations excessives d'énergie liées aux méthodes classiques de chauffage des locaux.

5.3.4 Maintien de la qualité sanitaire de l'air intérieur

Du fait du taux de renouvellement d'air élevé, la qualité de l'air intérieur est proche de celle de l'air extérieur. Elle risque donc moins d'être affectée par les sources de polluants généralement présentes à l'intérieur des bâtiments, en particulier par les polluants émanant des matériaux de construction courants.

5.3.5 Gestion des problèmes de pollution atmosphérique

Du fait d'un apport élevé d'air extérieur non traité, la qualité de l'air intérieur est plus affectée par la pollution atmosphérique (Weschler & Shields, 2000 ; Ghiaus et al., 2005). Dans les régions où la pollution atmosphérique est préoccupante, l'emplacement d'un établissement recevant des patients atteints de maladies infectieuses doit être choisi avec soin. Un système de ventilation hybride (mixte) est parfois la seule option possible, lorsque l'ouverture des fenêtres exposerait les occupants à un haut niveau de pollution atmosphérique.

5.3.6 Bruit extérieur

Selon le CIBSE (2005), la présence d'importantes sources de bruit est l'un des principaux obstacles à l'utilisation de la ventilation naturelle. Ce guide préconise deux solutions : l'une d'elles consiste à disposer les bouches d'admission d'air sur les côtés du bâtiment éloignés des principales sources de bruit ; l'autre à intégrer aux bouches d'aération des dispositifs d'amortissement acoustique. Cette seconde solution a toutefois pour effet de réduire le taux de renouvellement d'air, et il est donc préférable de l'associer à une ventilation hybride (mixte), afin qu'un ventilateur mécanique pallie la perte de charge liée à ce type de bouche d'aération.

5.3.7 Choix de matériaux de construction peu polluants

Les polluants émis par les matériaux de construction à l'intérieur des bâtiments ont fait l'objet de nombreuses études depuis quelques années (Levin, 1989 ; Li & Niu, 2007). Les concepteurs et les prestataires doivent être informés des normes et règlements relatifs aux matériaux utilisables dans les bâtiments. Les matériaux pouvant émettre des polluants atmosphériques irritants pour les voies respiratoires, en particulier, doivent être évités.

5.3.8 Humidité et développement de moisissures

De nombreux facteurs peuvent donner lieu à de la condensation sur les plafonds, murs, sols et lits des patients. Ainsi, dans les constructions lourdes ventilées naturellement, un brusque changement de temps et l'apparition d'une atmosphère extérieure chaude et humide peut induire des phénomènes de condensation si la température des surfaces est plus basse que le point de rosée de l'air entrant, chargé d'humidité (Niu, 2001). Cela se traduit par un inconfort et une gêne immédiats, et peut favoriser à terme le développement de moisissures, qui constituent un risque pour la santé.

Au stade de la conception de bâtiments ventilés naturellement pour des climats chauds et humides, il faut opter pour des murs en matériaux légers et isolés. La température de surface d'une construction légère ou d'un mur à isolation intégrée réagit rapidement aux changements de température de l'air, ce qui limite l'augmentation de l'humidité relative à l'intérieur et à la surface du mur, lorsque de l'air soudainement chaud et humide entre en contact avec le mur (lors d'un changement de temps survenant au printemps, par exemple).

Dans le cas des bâtiments existants, comportant des murs en béton massif ou en pierre, diverses stratégies d'adaptation, d'exploitation et de maintenance peuvent être nécessaires si un système de ventilation naturelle est envisagé. La première option consiste en un traitement des surfaces intérieures, qui peut être une mesure à court ou long terme.

5.3.9 Sécurité et propagation de maladies à transmission vectorielle

De larges ouvertures non protégées dans les bâtiments ventilés naturellement augmentent les risques d'intrusion et le risque de propagation de maladies à transmission vectorielle. Des fenêtres à barreaux et des moustiquaires semi-transparentes réalisées sur mesure permettent de prévenir ces risques.

5.3.10 Bâtiments de grande hauteur

Il peut être souhaitable, dans les Bâtiments de grande hauteur, de placer les chambres d'isolement respiratoire aux niveaux supérieurs, afin de réduire à un minimum le risque de réintroduction de l'air extrait dans les étages voisins. Cette réintroduction résulte des phénomènes de tirage, l'air extrait des chambres étant habituellement chaud et tendant à s'évacuer vers le haut (Wehrle et al., 1970).

5.3.11 Sécurité incendie

La conception d'un bâtiment comportant des ouvertures communicantes peut aller à l'encontre des impératifs de sécurité incendie et de protection contre les fumées. Les immeubles ventilés naturellement peuvent faire l'objet d'un zonage, pour répondre aux exigences de compartimentage liées à la lutte contre les fumées. Les ouvertures de ventilation peuvent aussi être fermées en cas d'incendie. Les voies d'évacuation en cas d'incendie doivent faire l'objet d'une attention particulière, car l'aménagement des locaux pour la ventilation naturelle a également un impact sur le schéma d'écoulement des fumées.

5.4 Démarche de conception des systèmes de ventilation naturelle et de ventilation hybride

La démarche de conception d'un bâtiment ventilé naturellement à des fins de lutte contre l'infection comporte trois grandes étapes :

1. Spécification du schéma de circulation d'air souhaité, des orifices d'entrée aux orifices de sortie d'air en passant par les chambres et les autres espaces de l'hôpital comme les couloirs. Cette étape est liée à la forme du bâtiment (couloir latéral, couloir central, cour, etc.) et à son organisation (emplacements respectifs des services infirmiers, bureaux, stockages, etc.), qui dépend de l'usage auquel est destiné le bâtiment et des conditions prévalant sur le site (vents dominants, notamment).
2. Identification des principales forces motrices disponibles pour réaliser le schéma de circulation d'air souhaité. Les stratégies efficaces pour lutter contre les infections tendent à reposer principalement sur la force du vent, bien que la stratégie fondée sur l'effet cheminée puisse également être efficace lorsqu'elle est bien conçue. L'utilisation conjointe des effets du vent et du tirage doit être envisagée si nécessaire, et si cette option est réalisable. Dans certains cas, on pourra utiliser une ventilation hybride (mixte) dans laquelle des ventilateurs complètent les forces naturelles. Dans un projet bien conçu, les principales forces motrices disponibles sont en synergie avec le schéma de circulation d'air recherché.
3. Détermination des dimensions et de l'emplacement des ouvertures de telle sorte que les débits de ventilation requis puissent être assurés quels que soient les régimes de fonctionnement. Ce processus comporte lui-même trois étapes. La première consiste à déterminer les débits de ventilation en fonction des exigences de lutte contre l'infection définies dans la première partie du présent document. La seconde, à déterminer la taille et l'emplacement des ouvertures pour obtenir ces débits d'air dans les conditions projetées. La troisième, à concevoir un système de régulation permettant de maintenir les débits requis dans des conditions variables de temps et d'occupation des locaux.

La démarche générale de conception de la ventilation naturelle couvre les aspects suivants :

- *Conception architecturale* —architectes et ingénieurs doivent définir en amont la géométrie d'ensemble du système (implantation du bâtiment et configuration du site, forme générale du bâtiment et positions approximatives des entrées d'air neuf et des sorties d'air vicié, notamment), compte tenu des vents dominants et du régime des vents, ainsi que des variations journalières et saisonnières.
- *Agencement du système et sélection de ses composantes* — le concepteur trace ensuite les cheminements d'air, des ouvertures d'admission aux ouvertures de sortie, qui assureront la circulation d'air requise (pour la lutte contre l'infection et le confort thermique, notamment) et choisit les types de composantes (fenêtres, portes, bouches d'aération, cheminées solaires, etc.) qui permettront de réguler le flux d'air.
- *Dimensionnement des ouvertures (portes, fenêtres, bouches d'aération, etc.)* — le concepteur fixe les dimensions des composantes choisies compte tenu des exigences de ventilation et des conditions climatiques. Il doit intégrer les contraintes (ou critères) de conception tant intérieures qu'extérieures.
- *Stratégie de régulation* — le concepteur doit ensuite élaborer une stratégie de régulation permettant d'ajuster les flux de ventilation aux valeurs de consigne lorsque les conditions de fonctionnement varient. À ce stade, il peut être nécessaire de recourir à des solutions de régulation matérielles, mais aussi logicielles, si une stratégie de ventilation naturelle assistée est utilisée.
- *Plans de conception détaillée* — enfin, le concepteur doit réaliser des plans détaillés permettant de construire le système.

5.4.1 Dimensionnement des orifices de ventilation

Le dimensionnement des orifices de ventilation consiste à estimer la surface des ouvertures permettant d'obtenir les débits d'air requis, à partir des données relatives à la géométrie, au climat et à d'autres éléments de conception du bâtiment. Le dimensionnement des ouvertures dépend notamment de leur répartition, qui relève de la stratégie de ventilation.

Deux types de méthodes permettent d'estimer la surface que doivent avoir les orifices.

- *Les méthodes directes* s'appliquent aux bâtiments simples où le débit de ventilation est une fonction simple des paramètres du système. Allard (1998) présente cinq de ces méthodes.
- *Les méthodes indirectes* recourent à la modélisation pour tester différentes combinaisons d'ouvertures et identifier la meilleure. La méthode de conception basée sur les équations de pression des « boucles » de ventilation, proposée par Axley (1998), est prometteuse.

Après avoir estimé les débits de ventilation requis dans chaque zone d'un bâtiment, on peut utiliser ces méthodes pour concevoir les principaux cheminements de l'air et dimensionner les orifices de ventilation selon les exigences propres à chaque zone. Lors de la conception de bâtiments de grandes dimensions, il peut être nécessaire d'étudier différentes options, en comparant par exemple la ventilation naturelle et la ventilation mécanique, etc.

Lorsqu'un bâtiment est conçu et exploité avec une configuration donnée d'ouvertures et de circulation de l'air, le débit de ventilation sera déterminé principalement par les forces motrices naturelles. Au stade de la conception, il est important de tirer parti des vents dominants et d'optimiser et de réguler les forces de tirage (effets cheminée) s'exerçant dans le bâtiment. Il faut pour cela définir avec soin l'emplacement et les dimensions des ouvertures et adopter une démarche innovante dans l'utilisation des dispositifs permettant d'accroître les forces naturelles, comme les tours à vent ou les cheminées solaires.

Augmentation transitoire du débit de ventilation

L'un des avantages de la ventilation naturelle est qu'elle permet de planifier un débit de ventilation transitoirement beaucoup plus élevé que le minimum spécifié dans la première partie du présent document. Lorsque la température extérieure est confortable et que l'air est propre, il est bénéfique d'augmenter le débit d'air neuf. Selon les données climatiques et la configuration des bâtiments, un débit d'air élevé peut aussi être utilisé pour rafraîchir l'atmosphère en été. Une augmentation de débit transitoire peut également être nécessaire lors de travaux de rénovation du bâtiment générant de grandes quantités de polluants atmosphériques.

5.4.2 Trois éléments majeurs dans la conception de la ventilation naturelle

Pour concevoir un système de ventilation naturelle, il ne suffit pas d'évaluer les dimensions des orifices de ventilation et des fenêtres. Il faut aussi adopter une démarche innovante et être attentif aux détails. On doit à Priolo (1998) un guide très complet de conception de la ventilation naturelle. On donnera ici un bref aperçu des trois aspects essentiels intervenant dans le processus de conception de la ventilation naturelle :

- *conception du site* — implantation du bâtiment, agencement du site, orientation du bâtiment, aménagement paysager ;
- *conception du bâtiment* — type, fonction et forme du bâtiment, enveloppe, stratégie de ventilation naturelle, distribution des espaces et des fonctions, masse thermique, chauffage, ventilation et conditionnement d'air éventuel ; et
- *conception des orifices de ventilation* — position, types et dimensions des orifices, stratégie de régulation.

Conception du site

La conception du site comprend l'intégration du bâtiment à la topographie et au bâti des lieux. Dans certains cas, des changements mineurs peuvent être apportés au site, dans les limites imposées par la protection de l'environnement et de la faune.

Pour la ventilation naturelle, il est préférable d'utiliser les flux d'air naturels du site, afin de tirer le meilleur parti de ce type de ventilation.

- S'il faut prévoir un refroidissement en été et une ventilation minimale en hiver, étudier la direction des vents dominants en été et en hiver et disposer le bâtiment de telle sorte qu'il reçoive plus d'air en été et soit protégé du vent en hiver.
- Lorsque plusieurs bâtiments doivent être construits sur un même site, s'assurer que chacun d'eux soit exposé au vent en été, mais pas en hiver, sous les climats froids.

On a vu au point 4.1 que le vent exerce une pression positive sur les ouvertures exposées au vent et une pression négative sur les ouvertures sous le vent. La forme et l'orientation du bâtiment doivent se traduire par une augmentation de la pression négative dans le sillage des flux d'air. Aynsley, Melbourne & Vickery (1977) fournissent des explications utiles sur le sillage sous le vent selon la forme des bâtiments.

La végétation affecte également le mouvement de l'air autour d'un bâtiment, en l'abritant du vent ou en ayant un effet de déflexion, de canalisation et d'accélération de l'air. La qualité de l'air et son comportement sont également modifiés lorsqu'il traverse la végétation (arbres, par exemple).

Conception des bâtiments

Pour les bâtiments simples, suivre les conseils de Priolo (1998) sur la conception du toit, le rapport longueur/largeur et l'utilisation de surplombs, de murs anti-vent et d'espaces en retrait. Pour les grands bâtiments de forme complexe, étudier la dynamique des fluides par modélisation numérique (Fluent, 2003, par exemple) afin d'explorer les différentes options de conception et d'améliorer les possibilités offertes par la ventilation naturelle, en évitant les courants d'air froid. Veiller au confort des piétons à l'extérieur des bâtiments.

La distribution de l'espace intérieur est également importante. Ainsi, les espaces relativement « sales » doivent être du côté sous le vent, pour éviter le reflux d'air pollué et d'odeurs vers les autres parties du bâtiment. De grandes fenêtres dans les autres espaces de vie du côté exposé au vent (chambres de patients, notamment) peuvent créer un appel d'air favorisant le flux d'air entrant. Cloisons et meubles ne doivent pas faire obstacle au flux d'air.

Pour la lutte contre l'infection, il est préférable que les chambres soient disposées sur un seul côté plutôt qu'en deux rangées séparées par un couloir central, du point de vue de la ventilation naturelle et de la lumière du jour. Les grands espaces ouverts doivent toujours avoir de grandes fenêtres sur les murs opposés. Si les pièces sont disposées autour d'un couloir central, la ventilation naturelle peut être améliorée en combinant la ventilation traversante et l'effet cheminée (le tirage) par des orifices de ventilation disposés dans le couloir, ou des gaines dans les immeubles à étages.

Dans les établissements comportant des étages, les cages d'escalier et autres gaines peuvent jouer le rôle de systèmes d'extraction pour éviter que l'air chaud ne pénètre dans les appartements ou bureaux des étages supérieurs. Les bouches de sortie d'air des gaines doivent être disposées en façade sous le vent, au-dessus du dernier étage, et les bouches d'admission en façade exposée au vent.

La profondeur de pénétration de la ventilation naturelle due au vent étant restreinte, la largeur du bâtiment est limitée (CIBSE, 2005). Cependant, l'utilisation de tours à vent permet de construire des immeubles plus larges.

Conception des orifices de ventilation

Quelle que soit la conception, c'est la surface de l'orifice le plus petit (goulot d'étranglement) qui détermine le débit de la ventilation naturelle. Les dimensions des orifices d'admission et de sortie doivent être aussi proches que possible les unes des autres pour que le débit d'air soit le plus élevé possible.

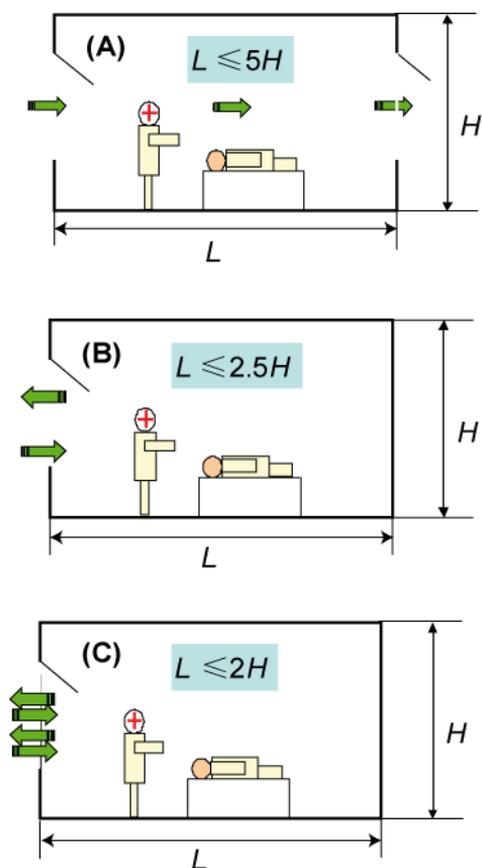
L'emplacement des ouvertures doit être étudié avec soin, en raison du conflit possible entre ventilation traversante et ventilation par tirage (ou effet cheminée), rafraîchissement des personnes et refroidissement de la masse thermique, etc.

Il est également important de bien choisir et concevoir les ouvertures (fenêtres, grillages, grilles d'aération, cheminées solaires, cheminées passives, etc.). On peut faire appel, pour leur dimensionnement, aux méthodes évoquées plus haut.

D'autres aspects doivent être pris en compte.

- *Meubles et cloisons* — les orifices de ventilation ne doivent pas être obstrués, et la disposition des meubles et des cloisons ne doit pas faire obstacle au cheminement d'air prévu, ni bloquer l'accès aux ouvertures.
- *Profondeur des chambres* — à la différence de la ventilation mécanique, la ventilation naturelle exige des immeubles peu profonds, pour que les courants d'air naturels pénètrent jusqu'au fond des bâtiments. On trouvera des règles empiriques pour la détermination de la profondeur des chambres dans le guide CIBSE (2005) (figure 5.3).
- *Création d'ombre* — stores, surplombs et décrochements (fenêtres en retrait, avec de profonds appuis de baie, notamment) peuvent être utilisés. L'ombre créée par le bâtiment lui-même, ou par des éléments distants (autre bâtiment, arbres, par exemple) peut aussi être efficace, si elle est bien prise en compte. On privilégiera les stores extérieurs rétractables.
- *Régulation de la lumière du jour et protection contre l'éblouissement* — les fenêtres peuvent être équipées d'écrans contre l'exposition directe aux rayons du soleil. La forme et la position des ouvrants des fenêtres sont également importantes. Les couleurs et les finitions des surfaces doivent en outre être choisies de façon à assurer un éclairage confortable et à prévenir l'éblouissement.
- *Chauffage et entrées d'air froid* — lors d'hivers modérément froids, des chauffages localisés peuvent être utilisés pour assurer le confort thermique. Cependant, si une différence de température trop importante est ainsi créée entre l'air intérieur et l'air extérieur, cela peut augmenter le tirage. La ventilation naturelle peut donc ne pas être une solution adaptée par temps très froid.
- *Rafrâichissement* — par temps chaud et humide, des systèmes de rafraîchissement localisés ou personnalisés peuvent être utilisés (ventilateurs de plafond ou de bureau, par exemple).
- *Bruit et acoustique* — le bruit de l'extérieur peut être évité en disposant les fenêtres et les autres orifices de ventilation à distance des principales sources de bruit. Des cloisons absorbantes ou des plafonds isolants, etc., peuvent être utilisés pour absorber le bruit.
- *Sécurité incendie* — la conception d'un bâtiment avec des ouvertures reliant les pièces peut aller à l'encontre des exigences de sécurité incendie et de lutte contre les fumées. Il peut être nécessaire de pouvoir fermer les orifices de ventilation en cas d'incendie. Toutefois, les bâtiments ventilés naturellement peuvent être conçus de façon à être conformes aux exigences de compartimentage anti-fumées. Les voies d'évacuation en cas d'incendie méritent une attention particulière, la conception de la ventilation naturelle ayant une incidence sur le schéma d'écoulement des fumées.

- *Sécurité* — l'ouverture des fenêtres peut comporter un risque en termes de protection des personnes et des biens, en particulier au rez-de-chaussée.



(A) Ventilation traversante. (B) Ventilation unilatérale actionnée par les seules forces de tirage (ventilation de type cheminée ou tirage, inefficace pour la lutte contre les infections à transmission aérienne). (C) Ventilation unilatérale (inefficace pour la lutte contre les infections à transmission aérienne).

Figure 5.3 Règles empiriques relatives à la profondeur des chambres pour trois stratégies de ventilation différentes.

5.5 Types de systèmes de ventilation naturelle

Les systèmes de ventilation naturelle sont classés d'après les principaux éléments de leur conception architecturale (couloirs, cours, tours à vent, cheminées, etc.). Ces éléments déterminent le cheminement du flux d'air et la stratégie de base de la ventilation naturelle.

On distingue six grands types de systèmes :

- couloir latéral
- couloir central
- cour
- tour à vent

- atrium et cheminée
- ventilation hybride (mixte).

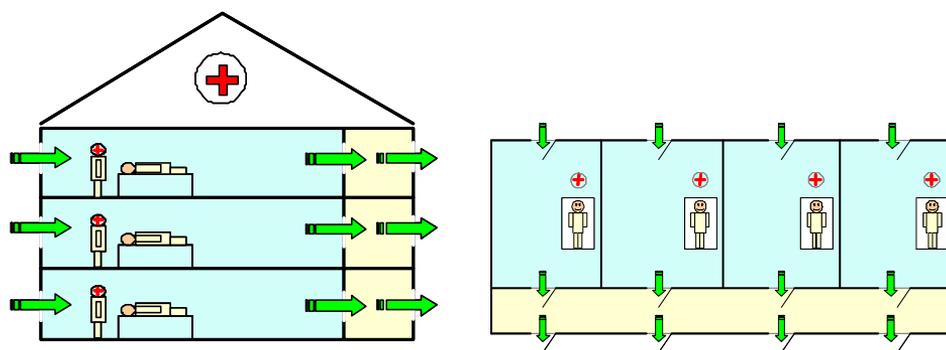
Ces différents systèmes sont décrits dans ce qui suit. Il est possible de combiner certains d'entre eux pour adapter la configuration au climat ou aux besoins spécifiques de l'hôpital. Les annexes F-I décrivent les systèmes de ventilation naturelle utilisés dans quatre hôpitaux de différents pays.

Ne sont envisagés dans ce guide que les systèmes de ventilation naturelle simple, et les concepteurs devront intégrer d'autres aspects (la régulation, notamment) pour la conception de solutions de ventilation naturelle assistée.

5.5.1 Couloir latéral

Dans le système à couloir latéral, le couloir longe les chambres sur un côté du bâtiment (figures 5.4 et 5.5). Le flux d'air est unidirectionnel, et dirigé soit des chambres vers le couloir, soit du couloir vers les chambres, selon l'incidence du vent. Ce flux unidirectionnel peut contribuer à prévenir les infections nosocomiales. La conception des fenêtres est cruciale dans ce type de configuration : il est préférable que la fenêtre et la porte de la chambre soient face à face, pour créer un flux d'air traversant (Allard, 1998).

On attribue à F. Beer la conception du premier hôpital à couloir dans lequel toutes les chambres étaient disposées le long de circulations internes. Cet hôpital, construit à Berne entre 1718 et 1724, était le premier de ce type.

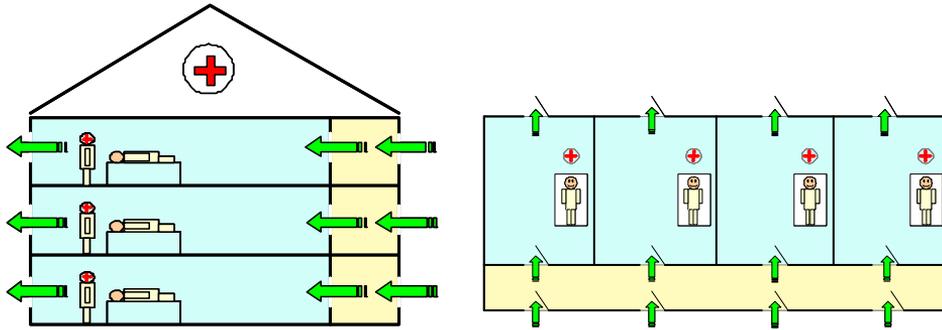


Coupe verticale

Plan d'un étage

Attention : ce schéma de principe doit être utilisé avec prudence, en tenant compte des contraintes spécifiques à chaque cas.

Figure 5.4 Ventilation due au vent dans un hôpital à couloir latéral où l'air pénètre par les chambres



Coupe verticale

Plan d'un étage

Attention : ce schéma de principe doit être utilisé avec prudence, en tenant compte des contraintes spécifiques à chaque cas.

Figure 5.5 Ventilation naturelle due au vent dans un hôpital à couloir latéral où l'air pénètre par le couloir

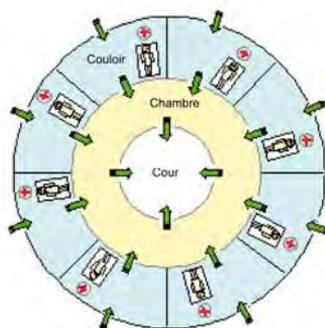
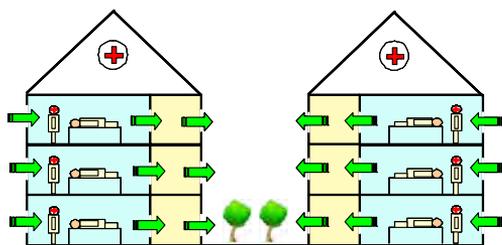
5.5.2 Couloir central

Le système à couloir central est dérivé du système à couloir latéral par l'adjonction d'une rangée de chambres supplémentaire de l'autre côté du couloir. L'air peut s'écouler d'une chambre au couloir, puis à la chambre opposée. Lorsque le vent est parallèle aux fenêtres, l'adjonction d'un mur en aile contribue à orienter l'air extérieur pour qu'il pénètre d'abord dans les chambres et sorte par le couloir central. Le modèle à couloir central peut se traduire par le passage d'air potentiellement contaminé des chambres exposées au vent aux chambres sous le vent. Ce type de conception n'est pas recommandé dans le présent guide.

5.5.3 Cour

Les cours sont traditionnellement des zones encloses qui peuvent contribuer à canaliser et à diriger le flux général de l'air et à modifier ainsi le microclimat autour des bâtiments. Selon la position relative des chambres et du couloir, on peut distinguer deux sous-types, le couloir étant soit côté cour soit côté extérieur (figures 5.6 et 5.7 respectivement). Ce système peut assurer une meilleure ventilation que les autres, à condition que la cour soit suffisamment grande. La configuration avec couloir extérieur présente un avantage sur le couloir intérieur, car elle permet d'éviter la transmission d'infections via le couloir, l'air neuf passant dans le couloir avant d'entrer dans les chambres.

Le premier hôpital de ce type était l'Ospedale Maggiore, construit à Milan en 1456 et conçu par Antonio Averulino (plus connu sous le nom de Filarete). C'est un bâtiment symétrique avec une grande cour centrale des deux côtés de laquelle les ailes du bâtiment délimitent quatre cours plus petites.

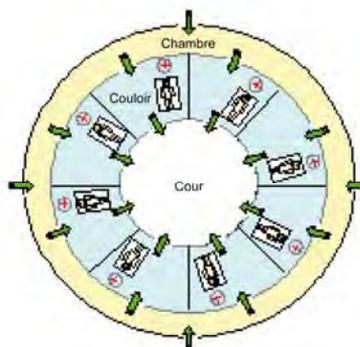
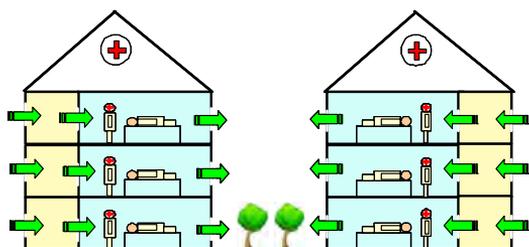


Coupe verticale

Plan d'un étage

Attention : ce schéma de principe doit être utilisé avec prudence, en tenant compte des contraintes spécifiques à chaque cas.

Figure 5.6 Ventilation naturelle combinant la force du vent et le tirage dans un hôpital avec cour et couloir intérieur



Coupe verticale

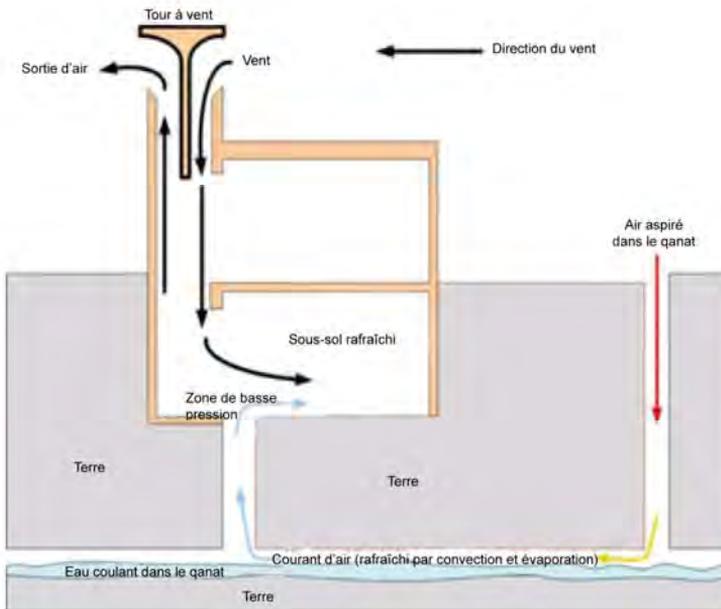
Plan d'un étage

Attention : ce schéma de principe doit être utilisé avec prudence, en tenant compte des contraintes spécifiques à chaque cas.

Figure 5.7 Ventilation naturelle combinant la force du vent et le tirage dans un hôpital avec cour et couloir extérieur

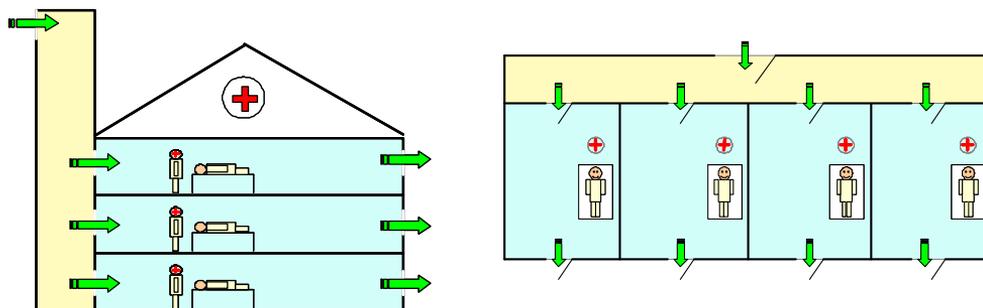
5.5.4 Tour à vent

Un système de ventilation naturelle avec tour à vent permet de capter l'air au niveau du toit et de le diriger de haut en bas vers le reste du bâtiment (figures 5.8 et 5.9). Des grilles d'aération à l'épreuve des intempéries sont installées pour protéger l'intérieur du bâtiment, et des registres de régulation du volume sont utilisés pour modérer le flux d'air. L'air vicié est extrait du côté sous le vent. La tour à vent est normalement divisée en quatre quadrants qui peuvent courir sur toute la longueur du bâtiment et assurer soit l'alimentation en air, soit l'extraction d'air selon la direction du vent.



Attention : ce schéma de principe doit être utilisé avec prudence, en tenant compte des contraintes spécifiques à chaque cas.

Figure 5.8 Conception d'une tour à vent



Coupe verticale

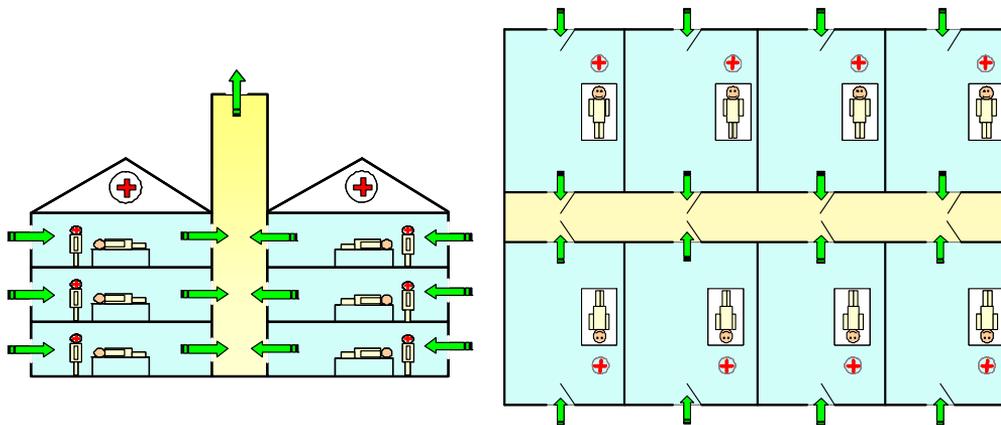
Plan d'un étage

Attention : ce schéma de principe doit être utilisé avec prudence, en tenant compte des contraintes spécifiques à chaque cas.

Figure 5.9 Ventilation naturelle due au vent dans un hôpital équipé d'une tour à vent

5.5.5 Atrium, cheminée

Un atrium ou une cheminée peut contribuer à optimiser le potentiel d'utilisation de la ventilation naturelle. Dans un système de ventilation naturelle à atrium ou cheminée, l'atrium ou la cheminée peut être disposé latéralement ou centralement, selon la position relative des chambres et de l'atrium ou de la cheminée (figure 5.10). L'air extérieur est aspiré dans les chambres par les fenêtres, sous l'effet du tirage (effet cheminée). Après dilution de l'air contaminé de la chambre, l'air chaud et pollué converge vers l'atrium ou la cheminée et s'évacue par les ouvertures en partie haute. L'applicabilité de ce type de conception dépend principalement de la hauteur de la cheminée, de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur et de ses interactions avec les conditions générales de vent. Ce mode de ventilation peut être combiné à des registres de régulation actionnés par un moteur et des capteurs de pression qui permettent de réguler les flux d'air et de pallier certaines des insuffisances de la ventilation naturelle.



Coupe verticale

Plan d'un étage

Attention : ce schéma de principe doit être utilisé avec prudence, en tenant compte des contraintes spécifiques à chaque cas.

Figure 5.10 Ventilation naturelle due au tirage (créé notamment par une cheminée solaire) dans un hôpital à cheminée solaire

5.5.6 Ventilation hybride (mixte)

L'un des facteurs limitants de la ventilation naturelle est qu'elle est parfois trop dépendante du climat extérieur. Ainsi, lorsque la vitesse du vent est trop faible ou la température extérieure trop élevée, l'efficacité de la ventilation naturelle est limitée. Pour surmonter ces carences, on peut recourir à la ventilation hybride (mixte). Dans un système simple de ventilation hybride (mixte), forces mécaniques et naturelles sont combinées pour donner un système fonctionnant selon deux modes, le mode de fonctionnement privilégié variant selon la saison et selon le moment de la journée, pour tenir compte de l'environnement extérieur et tirer à chaque instant le meilleur parti des conditions ambiantes.

On peut distinguer trois modes de fonctionnement de la ventilation hybride :

- alternance entre ventilation naturelle et ventilation mécanique
- ventilation naturelle assistée par des ventilateurs
- utilisation concomitante de la ventilation naturelle et de la ventilation mécanique.

Chacune des solutions de ventilation naturelle présentées plus haut (couloir latéral, couloir central, cour, tour à vent, atrium et cheminée) peut être combinée à des ventilateurs mécaniques pour créer un système hybride (mixte). Naturellement, comme pour tout système de ventilation naturelle ou mécanique, la conception et la régulation sont déterminantes.

5.6 Applicabilité des systèmes de ventilation naturelle

Les systèmes de ventilation naturelle doivent être conçus en fonction du climat. Il existe quatre grands types de climats : chaud et humide, chaud et sec, tempéré et froid.

La conception d'un système de ventilation naturelle peut répondre à l'un des trois objectifs majeurs suivants : assurer le confort thermique, lutter contre les infections à transmission aérienne ou améliorer la qualité de l'air, économiser l'énergie.

Pour évaluer un type de ventilation dans un contexte climatique donné, il convient de tenir compte du confort thermique et de la lutte contre les infections, mais pas des performances énergétiques.

Les performances sont évaluées comme suit :

- ★ Performances insuffisantes du point de vue du confort thermique ou de la lutte contre les infections. Pour la lutte contre les infections, le critère est la valeur du débit de ventilation.
- ★★ Performances passables.
- ★★★ Performances acceptables, mais pouvant nécessiter un compromis en matière de confort thermique.
- ★★★★ Performances bonnes du point de vue du confort thermique et de la lutte contre les infections.
- ★★★★★ Performances excellentes du point de vue du confort thermique et de la lutte contre les infections.

Le tableau 5.1 offre une comparaison des performances de différents systèmes de ventilation naturelle selon les quatre grands types de climats.

Tableau 5.1 Applicabilité potentielle des systèmes de ventilation naturelle en conditions idéales (consensus résultant d'une revue systématique de l'OMS)

Climat	Ventilation naturelle				Ventilation hybride (mixte)	Ventilation mécanique	
	Couloir latéral	Cheminée/ atrium	Cour				Tour à vent
			Couloir extérieur	Couloir intérieur			
Chaud et humide	★★	★	★★	★★	★	★★★	★★★★★
Chaud et sec	★★★	★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★
Tempéré	★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★
Froid	★	★★	★	★	★	★★	★★★★★

Attention : la réalisation n'est pas toujours à la hauteur du potentiel théorique, et un soin tout particulier doit être accordé à la conception de tout système de ventilation, dans le contexte difficile des établissements de soins présentant ou pouvant présenter des risques liés à la présence d'agents infectieux aéroportés.

5.7 Mise en service, exploitation et maintenance

Les performances d'un système de ventilation dépendent pour une très large part de sa conception, de son exploitation et de sa maintenance. Ces aspects déterminent les performances et la fiabilité du système de ventilation, et ce quel que soit le degré de technicité du système. Une construction et une mise en service adéquates sont nécessaires pour que les performances de ventilation requises soient assurées dans diverses conditions (climatiques), et une exploitation et une maintenance adaptées sont nécessaires pour que la ventilation soit assurée conformément aux spécifications sur toute la durée de vie du système.

5.7.1 Mise en service

Il importe que, même pour un système à très bas niveau de technicité, faisant appel à des grilles et à des orifices de ventilation, par exemple, une documentation expliquant les options de conception, le fonctionnement du système et la façon dont il faut en assurer la maintenance soit remise au directeur ou au gestionnaire du bâtiment. L'exposé des raisons pour lesquelles des orifices de ventilation d'une taille donnée ont été aménagés à des emplacements donnés, par exemple, facilitera la compréhension du système et incitera à assurer une maintenance de qualité.

Le concepteur doit remettre les documents suivants aux responsables du bâtiment et du système de ventilation :

- informations sur la stratégie de conception et le fonctionnement du système de ventilation naturelle ou hybride (mixte) ;
- informations sur l'exploitation du système de ventilation naturelle ou hybride (mixte) le jour et la nuit, à différentes saisons, en cas de conditions climatiques extrêmes et, éventuellement, en situation d'urgence ;
- explications destinées aux patients et aux soignants sur le fonctionnement et la gestion du bâtiment, précisant par exemple qui a le droit d'ouvrir les fenêtres, etc. ;
- règles d'exploitation et de maintenance du système de ventilation, élaborées en concertation avec le personnel chargé de la mise en service (manuel d'exploitation et de maintenance) ; et
- explications relatives aux points précédents (c'est-à-dire à la documentation requise).

Il est souhaitable que les utilisateurs du système aient la possibilité de fournir des informations en retour aux concepteurs, quelle que soit la simplicité du système. Ces informations, et les ajustements auxquels elles donnent lieu, sont essentiels pour résoudre d'éventuels problèmes, et doivent se poursuivre pendant la première année d'exploitation.

Le processus de mise en service constitue une sorte de procédure de contrôle visant à s'assurer que :

- le système de ventilation est installé et exploité comme prévu
- le système peut être utilisé correctement et sans risque
- le système peut être réglé de façon à satisfaire aux exigences de ventilation pour différentes conditions climatiques
- les débits de ventilation sont appropriés pour différents types de temps.

Ce processus doit se poursuivre au minimum pendant la première année d'exploitation.

5.7.2 Exploitation et maintenance

Le personnel d'exploitation et de maintenance doit comprendre comment fonctionne le système, et avoir quelques notions de lutte contre les infections. Une attention particulière doit être accordée à la documentation et aux instructions données au personnel.

Le personnel d'exploitation doit être formé aux procédures à suivre en cas de conditions météorologiques particulières comme de fortes pluies, des typhons ou de violentes tempêtes.

Les patients ne sont généralement pas autorisés à agir sur le système, sauf instruction contraire (cette règle s'applique également à l'ouverture des fenêtres).

La ventilation naturelle ou hybride (mixte) comporte généralement de nombreuses composantes (fenêtres, ventilateurs) en de multiples points. L'identification des défauts de ces composantes peut exiger beaucoup de temps.

Il est essentiel que tout hôpital conçu pour la lutte contre l'infection fasse l'objet d'un réexamen pour ce qui est de la conception de la ventilation lorsque les modes d'occupation changent.

Des enquêtes et des contrôles auprès des occupants aideront à identifier d'éventuels problèmes d'exploitation et à traiter les réclamations.

Dans un hôpital ventilé naturellement, la satisfaction des patients et des soignants peut être améliorée s'ils comprennent comment fonctionne le système.

5.8 Résumé

La conception d'un bâtiment ventilé naturellement pour la lutte contre l'infection comporte trois étapes essentielles : définition des schémas de circulation d'air souhaités, identification des principales forces motrices et détermination des dimensions et de l'emplacement des ouvertures. Bien que ces étapes soient communes à toutes les démarches de conception de ce type de bâtiment, les conditions locales, comme le climat sur une année et son impact sur la lutte contre les infections, doivent aussi être prises en compte.

A un niveau plus spécifique, les principaux éléments de conception d'un système de ventilation naturelle ou hybride (mixte) sont dictés par les composantes utilisées. Des éléments de différents systèmes de ventilation peuvent être sélectionnés et combinés selon les besoins, pour adapter le système au climat local et aux exigences propres à chaque établissement.

Références

- AIA. *Guidelines for design and construction of hospitals and health care facilities*. Washington, The American Institute of Architects Academy of Architecture for Health, 2001.
- Aintablian N, Walpita P, Sawyer MH. Detection of *Bordetella pertussis* and respiratory syncytial virus in air samples from hospital rooms. *Infection Control and Hospital Epidemiology* 1998, 19(12):918–923.
- Allard F ed. *Natural ventilation in buildings — a design handbook*. London, James & James, 1998.
- Anderson JD et al. Lack of nosocomial spread of *Varicella* in a pediatric hospital with negative pressure ventilated patient rooms. *Infection Control*, 1985, 6(3):120–121.
- Artenstein MS et al. Large-volume air sampling of human respiratory disease pathogens. *American Journal of Epidemiology*, 1967, 85(3):479–485.
- ASHRAE. Health care facilities. In: *Handbook of HVAC applications*. Atlanta, USA, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 2007a.
- ASHRAE. *HVAC design manual for hospitals and clinics*. Atlanta, USA, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 2007b.
- ASHRAE. *ASHRAE handbook fundamentals*. Atlanta, USA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 2009.
- Awbi HB. *Ventilation of buildings*, 2nd ed. New York, Taylor & Francis, 2003.
- Axley J. Introduction to the design of natural ventilation systems using loop equations. In: *Ventilation technologies in urban areas*, Proceedings of the 19th AIVC Conference, Oslo, Norway, 28–30 September 1998:47–56.
- Aynsley RM, Melbourne WH, Vickery BJ. *Architectural aerodynamics*. London, Applied Science Publishers, 1977.
- Barker J, Stevens D, Bloomfield SF. Spread and prevention of some common viral infections in community facilities and domestic homes. *Journal of Applied Microbiology*, 2001, 91:7–21.
- Bassetti S, Bischoff WE, Sherertz RJ. Are SARS superspreaders cloud adults? *Emerging Infectious Diseases*, 2005, 11(4):637–638.
- Bloch AB et al. Measles outbreak in a pediatric practice: airborne transmission in an office setting. *Pediatrics*, 1985, 75(4):676–683.
- Booth TF et al. Detection of airborne severe acute respiratory syndrome (SARS) coronavirus and environmental contamination in SARS outbreak units. *Journal of Infectious Diseases*, 2005, 191(9):1472–1477.
- Calder RA et al. *Mycobacterium tuberculosis* transmission in a health clinic. *Bulletin of the International Union against Tuberculosis & Lung Disease*, 1991, 66(2–3):103–106.

- CDC. Guidelines for environmental infection control in health-care facilities. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 2003, 52 (RR-10).
- CDC. Guidelines for preventing the transmission of *Mycobacterium tuberculosis* in health-care settings. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 2005, 54 (RR-17),
- Chen PS, Li CS. Concentration profiles of airborne *Mycobacterium tuberculosis* in a hospital. *Aerosol Science and Technology*, 2008, 42(3):194–200.
- Chen Q. Prediction of room air motion by Reynolds-stress models. *Building and Environment*, 1996, 31(3):233–244.
- CIBSE. *AM10 Natural ventilation in non-domestic buildings*. London, the Chartered Institution of Building Services Engineers, 2005.
- Cole EC, Cook CE. Characterization of infectious aerosols in health care facilities: an aid to effective engineering controls and preventive strategies. *American Journal of Infection Control*, 1998, 26(4):453–464.
- Craven A, Settles GS. A computational and experimental investigation of the human thermal plume. *Journal of Fluids Engineering*, 2006, 128(6):1251–1258.
- Dahl KM et al. Follow-up evaluation of respiratory isolation rooms in 10 Midwestern hospitals. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 1996, 17(12):816–818.
- Dragan A. HVAC design approach and design criteria for health care facilities. *ASHRAE Transactions: Annual Meeting*, 2000:637–645.
- Duguid JF. The numbers and the sites of origin of the droplets expelled during expiratory activities. *Edinburgh Medical Journal*, 1945, 52:335–340.
- Edge BA, Paterson EG, Settles GS. Computational study of the wake and contaminant transport of a walking human. *Journal of Fluids Engineering*, 2005, 127(5):967–977.
- Escombe AR et al. Natural ventilation for the prevention of airborne contagion. *PloS Medicine*, 2007, 4:309–317.
- Etheridge D, Sandberg M. *Building ventilation — theory and measurement*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 1996.
- Fennelly KP, Nardell EA. The relative efficacy of respirators and room ventilation in preventing occupational tuberculosis. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 1998, 19(10):754–759.
- Fennelly KP et al. Cough-generated aerosols of *Mycobacterium tuberculosis*: a new method to study infectiousness. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2004, 169(5):604–609.
- Fitzgerald D, Haas DW. *Mycobacterium tuberculosis*. In: Mandell GL, Bennett JE, Dolin R, eds. *Principles and practice of infectious diseases*, 6th ed. Philadelphia, Churchill Livingstone, 2005:2852–2886.
- Fluent. *FLUENT 6.1 user's guide*. Lebanon, NH, Fluent Inc., 2003.
- Fraser VJ et al. Evaluation of rooms with negative pressure ventilation used for respiratory isolation in seven midwestern hospitals. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 1993, 14(11):623–628.

- Gardner J. Centers for Disease Control: guideline for isolation precautions in hospitals. *American Journal of Infection Control*, 1996, 24:2–52.
- Garner JS, Simmons BP. *CDC guideline for isolation precautions in hospitals*. Atlanta, GA, US Department of Health and Human Services, 1983 (HHS Publication No. CDC 83-8314).
- Gerberding JL. Occupational infectious diseases or infectious occupational diseases? Bridging the views on tuberculosis controls. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 1993, 14:686–687.
- Ghiaus C et al. Outdoor–indoor pollutant transfer. In: Allard F, Ghiaus C, eds. *Natural ventilation in the urban environment — assessment and design*. London and Sterling, VA, Earthscan, 2005.
- Gustafson et al. An outbreak of airborne nosocomial varicella. *Pediatrics*, 1982, 70(4):550–556.
- Hamburger M, Roberston OH. Expulsion of group A hemolytic streptococci in droplets and droplet nuclei by sneezing, coughing, and talking. *American Journal of Medicine*, 1946, 4:690–701.
- Hayden CS et al. Air volume migration from negative pressure isolation rooms during entry/exit. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 1998, 13(7):518–527.
- Heiselberg P, Bjørn E. Impact of open windows on room air-flow and thermal comfort. *International Journal of Ventilation*, 2002, 1(2):91–100.
- Hutton MD et al. Nosocomial transmission of tuberculosis associated with a draining abscess. *Journal of Infectious Diseases*, 1990, 161(2):286–295.
- Huynh KN et al. A new method for sampling and detection of exhaled respiratory virus aerosols. *Clinical Infectious Diseases*, 2008, 46(1):93–95.
- Ip M et al. Air-flow and droplet spreading around oxygen masks: a simulation model for infection control research. *American Journal of Infection Control*, 2007, 35(10):684–689.
- ISIAQ. *ISIAQ review on indoor air quality in hospitals and other health care facilities*. International Society of Indoor Air Quality and Climate, 2003.
- Jennison MW. Atomizing of mouth and nose secretions into the air as revealed by high speed photograph. *Aerobiology*, 1942, 17:106–128.
- Klein BS, Perloff WH, Maki DG. Reduction of nosocomial infection during pediatric intensive care by protective isolation. *New England Journal of Medicine*, 1989, 320(26):1714–1721.
- Levin H. Building materials and indoor air quality. *Occupational Medicine: State of the Art Reviews*, 1989, 4:667–693.
- Li F, Niu JL. Control of volatile organic compounds indoors — development of an integrated mass-transfer-based model and its application. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(11):2344–2354.
- Li Y et al. An evaluation of the ventilation performance of new SARS isolation wards in nine hospitals in Hong Kong. *Indoor and Built Environment*, 2007, 16(5):400–410.

- Liu H. *Wind engineering: a handbook for structural engineers*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1991.
- Loudon RG, Roberts RM. Droplet expulsion from the respiratory tract. *American Review of Respiratory Disease*, 1967, 95:435–442.
- Lowbury EJJ et al. *Control of hospital infection*. London, Chapman and Hall, 1975.
- Lynch T. *Communicable disease nursing*. St. Louis, CV Mosby, 1949.
- Maki DG. Yes, Virginia, aseptic technique is very important: maximal barrier precautions during insertion reduce the risk of central venous catheter-related bacteremia. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 1994, 15(4 Pt 1):227–230.
- Maloney SA et al. Efficacy of control measures in preventing nosocomial transmission of multidrug-resistant tuberculosis to patients and health care workers. *Annals of Internal Medicine*, 1995, 122(2):90–95.
- Mastorides SM et al. The detection of airborne *Mycobacterium tuberculosis* using micropore membrane air sampling and polymerase chain reaction. *Chest*, 1999, 115(1):19–25.
- Mayhall CG. *Hospital epidemiology and infection control*, 3rd ed. Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins, 2004.
- Menzies D et al. Hospital ventilation and risk for tuberculous infection in Canadian health care workers. *Annals of Internal Medicine*, 2000, 133(10):779–789.
- Mills F. Indoor air standards in hospitals. *Business Briefing: Hospital Engineering and Facilities Management*, 2004:43–46.
- Morawska L. Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air*, 2006, 16(5):335–347.
- Nardell EA et al. Airborne infection: theoretical limits of protection achievable by building ventilation. *American Review of Respiratory Diseases*, 1991, 144(2):302–306.
- NCDC. *Isolation techniques for use in hospitals*. Washington DC, National Communicable Disease Center, US Government Printing Office, 1970 (PHS Publication No. 2054).
- Nicas M, Nazaroff WW, Hubbard A. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2005, 2(3):143–154.
- Nielsen PV. *Flow in air conditioned rooms — model experiments and numerical solutions of the flow equations* [PhD thesis]. Denmark, Technical University of Denmark, 1974.
- Niu JL. Technology options for humidity control for hotels in south-eastern China climate. *HKIE Transactions*, 2001, 8(2):20–24.
- Papineni RS, Rosenthal FS. The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects. *Journal of Aerosol Medicine*, 1997, 10(2):105–116.
- Pavelchak N et al. Identification of factors that disrupt negative air pressurization of respiratory isolation rooms. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 2000, 21(3):191–195.

- Pavelchak N et al. Negative-pressure monitoring of tuberculosis isolation rooms within New York State hospitals. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 2001, 22(8):518–519.
- Priolo C. Design guidelines and technical solutions for natural ventilation. In: Allard F, ed. *Natural ventilation in buildings — a design handbook*. London, James & James, 1998:195–254.
- Qian H et al. Dispersion of exhaled droplet nuclei in a two-bed hospital ward with three different ventilation systems. *Indoor Air*, 2006, 16(2):111–128.
- Rice N, Streifel A, Vesley D. An evaluation of hospital special-ventilation-room pressures. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 2001, 22(1):19–23.
- Riley EC, Murphy G, Riley RL. Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *American Journal of Epidemiology*, 1978, 107(5):421–432.
- Riley RL, O’Grady F. *Airborne infection: transmission and control*. New York, The Macmillan Company, 1961.
- Riley RL et al. Air hygiene in tuberculosis — quantitative studies of infectivity and control in a pilot ward. Cooperative Study between the Veterans Administration, the Johns-Hopkins-University School of Hygiene and Public Health, and the Maryland-Tuberculosis-Association. *American Review of Tuberculosis and Pulmonary Diseases*, 1957, 75(3):420–431.
- Riley RL et al. Aerial dissemination of pulmonary tuberculosis. *American Journal of Hygiene*, 1959, 70:185–196.
- Roy CJ, Milton DK. Airborne transmission of communicable infection — the elusive pathway. *New England Journal of Medicine*, 2004, 350(17):1710–1712.
- Sawyer MH et al. Detection of Varicella-zoster virus DNA in air samples from hospital rooms. *Journal of Infectious Diseases*, 1994, 169(1):91–94.
- Siegel JD et al. *2007 guideline for isolation precautions: preventing transmission of infectious agents in healthcare settings*. Public Health Service, US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, 2007 (<http://www.cdc.gov/ncidod/dhqp/pdf/guidelines/Isolation2007.pdf>)
- Stetzenbach LD, Buttner MP, Cruz P. Detection and enumeration of airborne biocontaminants. *Current Opinion in Biotechnology*, 2004, 15(3):170–174.
- Sutton PM et al. Evaluating the control of tuberculosis among healthcare workers: adherence to CDC guidelines of three urban hospitals in California. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 1998, 19(7):487–493.
- Suzuki K et al. Detection of Varicella-zoster virus DNA in throat swabs of patients with herpes zoster and on air purifier filters. *Journal of Medical Virology*, 2002, 66(4):567–570.
- Suzuki K et al. Spread of Varicella-zoster virus DNA to the environment from Varicella patients who were treated with oral acyclovir. *Pediatrics International*, 2003, 45(4):458–460.

- Tang JW et al. Door-opening motion can potentially lead to a transient breakdown in negative-pressure isolation conditions: the importance of vorticity and buoyancy airflows. *Journal of Hospital Infection*, 2005, 61(4):283–286.
- Tang JW et al. Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises. *Journal of Hospital Infection*, 2006, 64(2):100–114.
- Toth A et al. Tuberculosis prevention and treatment. *Can Nurse*, 2004, 100(9):27–30.
- Wehrle PF et al. An airborne outbreak of smallpox in a German hospital and its significance with respect to other recent outbreaks in Europe. *Bulletin of the World Health Organization*, 1970, 43:669–679.
- Wells WF. On air-borne infection. Study II. Droplets and droplet nuclei. *American Journal of Hygiene*, 1934, 20:611–618.
- Wells WF. *Airborne contagion and air hygiene*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1955.
- Wenzel RP. *Prevention and control of nosocomial infections*, 4th ed. Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins, 2003.
- Weschler CJ, Shields HC. The influence of ventilation on reactions among indoor pollutants: modelling and experimental observations. *Indoor Air*, 2000, 10(2):92–100.
- WHO. *Guidelines for the prevention of tuberculosis in health care facilities in resource-limited settings*. Geneva, World Health Organization, 1999.
- WHO. *Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory diseases in health care — WHO interim guidelines*. Geneva, World Health Organization, 2007.
- Wilson P. Is natural ventilation a useful tool to prevent the air borne spread of TB? *PLoS Medicine*, 2007, 4(2):e77.
- Wong CY. Severe acute respiratory syndrome and biology, air quality, physics, and mechanical engineering. *Hong Kong Medical Journal*, 2003, 9(4):304–305.
- Wong KC, Leung KS. Transmission and prevention of occupational infections in orthopaedic surgeons. *Journal of Bone and Joint Surgery America*, 2004, 86-A(5):1065–1076.
- Xia YZ et al. Influence of turbulence on thermal comfort at warm conditions. *Indoor Air*, 2000, 10(4):289–296.
- Xie X et al. How far droplets can move in indoor environments — revisiting the Wells evaporation-falling curve. *Indoor Air*, 2007, 17(3):211–225.
- Zhang H et al. Enhanced performance of air-cooled chillers using evaporative cooling. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2000, 21(4):213–217.

Annexes

Annexe A Articles inclus dans la revue systématique sur les relations entre ventilation et infection

Les questions posées dans le cadre de la revue systématique ont été définies par le Groupe de conception du guide de l'Organisation mondiale de la Santé, et la méthodologie à adopter a été élaborée par le Groupe de conception technique du guide puis validée par le Comité de pilotage externe.

La revue systématique a été menée à bien par une équipe d'assistants de recherche (sous la direction du Professeur Yuguo Li, Université de Hong Kong), avec le concours d'un documentaliste de la bibliothèque de l'Université de Hong Kong. Les termes de recherche comprenaient des mots clés et des termes du thésaurus Medical Subject Headings (MeSH) relatifs à la ventilation, à l'infection et aux bâtiments. La recherche a porté sur des bases de données comme MEDLINE, EBM Reviews, ISI Web of Science, ScienceDirect, Engineering Village 2 et ISI ProceedingsSM. Google Scholar a également été interrogé.

Des critères préétablis d'inclusion et d'exclusion ont été utilisés, et un tableau d'experts comprenant des experts en médecine, santé, ingénierie et architecture a contrôlé le processus de revue de la littérature depuis l'élaboration de la stratégie de recherche jusqu'à l'évaluation critique des études identifiées, l'extraction des données et leur présentation. Le Comité de pilotage externe a validé les résultats définitifs et leur utilisation pour l'élaboration du guide.

Sur un total de 13 661 articles correspondant aux mots clés définis dans le protocole de la revue systématique, 388 articles ont été extraits, et 65 ont été retenus selon les critères d'inclusion et d'exclusion, puis distribués à un tableau de seize experts d'Europe, d'Amérique du Nord, d'Australie et d'Asie.

Ces 65 articles sont ceux de la liste ci-après.

1. Anderson JD et al. Lack of nosocomial spread of Varicella in a pediatric hospital with negative pressure ventilated patient rooms. *Infection Control*, 1985, 6(3):120–121.
2. Andrewes CH, RE Glover. Spread of infection from the respiratory tract of the ferret. I. Transmission of influenza A virus. *British Journal of Experimental Pathology*, 1941, 22(2):91–97.
3. Basu S et al. Prevention of nosocomial transmission of extensively drug-resistant tuberculosis in rural South African district hospitals: an epidemiological modelling study. *Lancet*, 2007, 370(9597):1500–1507.
4. Bloch AB et al. Measles outbreak in a pediatric practice: airborne transmission in an office setting. *Pediatrics*, 1985, 75(4):676–683.
5. Brundage JF et al. Building-associated risk of febrile acute respiratory diseases in army trainees. *JAMA*, 1988, 259(14):2108–2112.

6. Calder RA et al. *Mycobacterium tuberculosis* transmission in a health clinic. *Bulletin of the International Union against Tuberculosis & Lung Disease*, 1991, 66(2–3):103–106.
7. Cars H, Petersson C, Hakansson A. Infectious-diseases and day-care-center environment. *Scandinavian Journal of Infectious Diseases*, 1992, 24(4):525–528.
8. Couch RB et al. Airborne transmission of respiratory infection with coxsackievirus A type 21. *American Journal of Epidemiology*, 1970, 91(1):78–86.
9. Dick EC et al. Aerosol transmission of rhinovirus colds. *Journal of Infectious Diseases*, 1987, 156(3):442–448.
10. Drinka PJ et al. Report of an outbreak: nursing home architecture and influenza-A attack rates. *Journal of the American Geriatrics Society*, 1996, 44(8):910–913.
11. Drinka PJ et al. Delays in the application of outbreak control prophylaxis for influenza A in a nursing home. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 2002, 23(10):600–603.
12. Drinka PJ et al. Report of an outbreak: nursing home architecture and influenza-A attack rates: update. *Journal of the American Geriatrics Society*, 2004, 52(5):847–848.
13. Edlin BR et al. An outbreak of multidrug-resistant tuberculosis among hospitalised-patients with the acquired-immunodeficiency-syndrome. *New England Journal of Medicine*, 1992, 326(23):1514–1521.
14. Ehrenkranz NJ, Kicklighter JL. Tuberculosis outbreak in a general hospital: evidence for airborne spread of infection. *Annals of Internal Medicine*, 1972, 77(3):377–382.
15. Ehresmann KR. An outbreak of measles at an international sporting event with airborne transmission in a domed stadium. *Journal of Infectious Diseases*, 1995, 171:679–683.
16. Escombe AR et al. The detection of airborne transmission of tuberculosis from HIV-infected patients, using an in vivo air sampling model. *Clinical Infectious Diseases*, 2007, 44(10):1349–1357.
17. Escombe AR et al. Natural ventilation for the prevention of airborne contagion. *PloS Medicine*, 2007, 4(2):309–317.
18. Greene D, Barenberg LH, Greenberg B. Effect of irradiation of the air in a ward on the incidence of infections of the respiratory tract — with a note on Varicella. *American Journal of Diseases of Children*, 1941, 61(2):273–275.
19. Gustafson TL et al. An outbreak of airborne nosocomial varicella. *Pediatrics*, 1982, 70(4):550–556.
20. Henle W, Sommer HE, Stokes J. Studies on air borne infection in a hospital ward II: effects of ultraviolet irradiation and propylene glycol vaporization upon the prevention of experimental air borne infection of mice by droplet nuclei. *Journal of Pediatrics*, 1942, 21:577–590.
21. Hocking M. Common cold transmission in commercial aircraft: industry and passenger implications. *Journal of Environmental Health Research*, 2004, 3(1):7–12.

22. Hoge CW et al. An epidemic of pneumococcal disease in an overcrowded, inadequately ventilated jail. *New England Journal of Medicine*, 1994, 331(10):643–648.
23. Houk V. Spread of tuberculosis via recirculated air in a naval vessel: the Byrd study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1980, 353:10–24.
24. Houk VN et al. The epidemiology of tuberculosis infection in a closed environment. *Archives of Environmental Health*, 1968, 16(1):26–35.
25. Hutton MD et al. Nosocomial transmission of tuberculosis associated with a draining abscess. *Journal of Infectious Diseases*, 1990, 161(2):286–295.
26. Jennings LC, Dick EC. Transmission and control of rhinovirus colds. *European Journal of Epidemiology*, 1987, 3(4):327–335.
27. Josephson A. Airborne transmission of nosocomial varicella from localised zoster. *Journal of Infectious Diseases*, 1988, 158(1):238–241.
28. Kenyon TA et al. Transmission of multidrug-resistant *Mycobacterium tuberculosis* during a long airplane flight. *New England Journal of Medicine*, 1996, 334(15):933–938.
29. Kingston D, Lidwell OM, Williams REO. The epidemiology of the common cold: III. The effect of ventilation, air disinfection and room size. *Journal of Hygiene*, 1962, 60(3):341–352.
30. Leclair JM et al. Airborne transmission of chickenpox in a hospital. *New England Journal of Medicine*, 1980, 302(8):450–453.
31. Lester W. The influence of relative humidity on the infectivity of air-borne influenza-A virus (Pr8-strain). *Journal of Experimental Medicine*, 1948, 88(3):361–368.
32. Li Y et al. Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong. *Indoor Air*, 2005, 15(2):83–95.
33. Li Y et al. Multi-zone modeling of probable SARS virus transmission by air-flow between flats in Block E, Amoy Gardens. *Indoor Air*, 2005, 15(2):96–111.
34. Li Y et al. Probable roles of bio-aerosol dispersion in the SARS outbreak in Amoy Gardens, Hong Kong. In: Sleigh A et al., eds. *Population dynamics and infectious disease in the Asia–Pacific*. Singapore, World Scientific Publishing, 2006.
35. Loosli CG, Robertson OH, Puck TT. The production of experimental influenza in mice by inhalation of atmospheres containing influenza virus dispersed as fine droplets. *Journal of Infectious Diseases*, 1943, 72:142–153.
36. Loudon RG et al. Aerial transmission of mycobacteria. *American Review of Respiratory Disease*, 1969, 100(2):165–171.
37. Lovelock JE, Further studies on the natural transmission of the common cold. *Lancet*, 1952(Oct 4):657–660.
38. Lowen AC et al. The guinea pig as a transmission model for human influenza viruses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(26):9988–9992.

39. Lowen AC et al. Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. *PLoS Pathogens*, 2007, 3(10):1470–1476.
40. Menzies D et al. Hospital ventilation and risk for tuberculous infection in Canadian health care workers. *Annals of Internal Medicine*, 2000, 133(10):779–789.
41. Meschievitz CK, Schultz SB, Dick EC. A model for obtaining predictable natural transmission of rhinoviruses in human volunteers. *Journal of Infectious Diseases*, 1984, 150(2):195–201.
42. Miller WR. Evaluation of ultraviolet radiation and dust control measures in control of respiratory disease at a naval training center. *Journal of Infectious Diseases*, 1948:87–100.
43. Moser MR et al. An outbreak of influenza aboard a commercial airliner. *American Journal of Epidemiology*, 1979, 110(1):1–6.
44. Olsen SJ et al. Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft. *New England Journal of Medicine*, 2003, 349(25):2416–2422.
45. Palmer GT. Ventilation, weather, and the common cold — a study of the prevalence of respiratory affections among school children and their association with school ventilation and the seasonal changes in weather. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 1921, 7:39–52.
46. Pei LY et al. Investigation of the influencing factors on severe acute respiratory syndrome among health care workers. *Journal of Peking University (Health Sciences)*, 2006, 38(3):271–275.
47. Ratcliffe HL, Palladino VS. Tuberculosis induced by droplet nuclei infection — initial homogeneous response of small mammals (rats, mice, guinea pigs, and hamsters) to human and to bovine bacilli, and the rate and pattern of tubercle development. *Journal of Experimental Medicine*, 1953, 97(1):61–68.
48. Remington PL et al. Airborne transmission of measles in a physician's office. *Journal of the American Medical Association*, 1985, 253(11):1574–1577.
49. Riley EC. Aerial dissemination of pulmonary tuberculosis. *American Journal of Hygiene*, 1959, 70:185–196.
50. Riley RL, Riley EC, Murphy G. Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *American Review of Respiratory Disease*, 1978, 117(4):255–255.
51. Riley RL et al. Air hygiene in tuberculosis — quantitative studies of infectivity and control in a pilot ward — cooperative study between the Veterans Administration, the Johns-Hopkins-University School of Hygiene and Public Health, and the Maryland-Tuberculosis-Association. *American Review of Tuberculosis and Pulmonary Diseases*, 1957, 75(3):420–431.
52. Riley RL et al. Infectiousness of air from a tuberculosis ward — ultraviolet irradiation of infected air — comparative infectiousness of different patients. *American Review of Respiratory Disease*, 1962, 85(4):511–525.

53. Schulman JL. Experimental transmission of influenza virus infection in mice — relationship of transmissibility of different strains of virus and recovery of airborne virus in environment of infector mice. *Journal of Experimental Medicine*, 1967, 125(3):479–488.
54. Schulman JL, Kilbourne ED. Airborne transmission of influenza virus infection in mice. *Nature*, 1962, 195(4846):1129–1130.
55. Schulman JL, Kilbourne ED. Experimental transmission of influenza virus infection in mice. I. The period of transmissibility. *Journal of Experimental Medicine*, 1963, 118:257–266.
56. Schulman JL, Kilbourne ED. Experimental transmission of influenza virus infection in mice. I. Some factors affecting the incidence of transmitted infection. *Journal of Experimental Medicine*, 1963, 118:267–275.
57. Shigematsu I, Minowa M. Indoor infection in a modern building. *Tokai Journal of Experimental and Clinical Medicine*, 1985 10(4):407–413.
58. Sommer HE, Stokes J. Studies on air borne infection in a hospital ward I: The effect of ultraviolet light on cross infection in an infants' ward. *Journal of Pediatrics*, 1942, 21:569–576.
59. Tang JW et al. Door-opening motion can potentially lead to a transient breakdown in negative-pressure isolation conditions: the importance of vorticity and buoyancy airflows. *Journal of Hospital Infection*, 2005, 61(4):283–286.
60. Tsujino G. Varicella infection in a children's hospital: prevention by vaccine and an episode of airborne transmission. *Biken Journal*, 1984, 27(2–3):129–132.
61. Wehrle PF et al. Airborne outbreak of smallpox in a German hospital and its significance with respect to other recent outbreaks in Europe. *Bulletin of the World Health Organization*, 1970, 43(5):669–679.
62. Wong TW et al. Cluster of SARS among medical students exposed to single patient, Hong Kong. *Emerging Infectious Diseases*, 2004, 10(2):269–276.
63. Yu IT et al. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. *New England Journal of Medicine*, 2004, 350(17):1731–1739.
64. Yu IT et al. Temporal-spatial analysis of severe acute respiratory syndrome among hospital inpatients. *Clinical Infectious Diseases*, 2005, 40(9):1237–1243.
65. Zitter JN et al. Aircraft cabin air recirculation and symptoms of the common cold. *Journal of the American Medical Association*, 2002, 288(4):483–486.

Annexe B Classement des recommandations par la méthode GRADE

B.1 Explication de la méthode GRADE de détermination du niveau des recommandations

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour déterminer le caractère plus ou moins strict des recommandations, en particulier les données probantes disponibles, le rapport effets bénéfiques — effets indésirables et charges, la variabilité des valeurs, et le rapport coûts — bénéfices nets.

Les données scientifiques ont été évaluées dans le cadre de la revue systématique menée pour les besoins du présent guide (voir l'annexe A pour plus de précisions).

Pour le classement global des recommandations, chacun des facteurs cités intervenait de la façon suivante.

- Plus les données sont probantes, plus une recommandation stricte est probable.
- Plus l'écart entre effets désirables et indésirables est grand, plus une recommandation stricte est probable. Plus le bénéfice net est faible et plus la certitude de ce bénéfice est faible, plus une recommandation modérée est probable.
- Plus la variabilité des valeurs et des préférences, ou l'incertitude des valeurs et des préférences, est grande, plus une recommandation modérée est probable.
- Plus les coûts d'une intervention sont élevés, et donc plus les ressources nécessaires sont importantes, moins une recommandation stricte est probable.

B.1.1 Recommandations strictes et recommandations conditionnelles

Les notions de recommandation stricte et de recommandation conditionnelle sont définies comme suit :

- **recommandation stricte** — le tableau d'experts est certain que les effets désirables de l'adoption de la recommandation sont supérieurs aux effets indésirables ; et
- **recommandation conditionnelle** — le tableau d'experts conclut que les effets désirables de l'adoption de la recommandation sont probablement supérieurs aux effets indésirables, mais n'en est pas certain.

B.1.2 Implications d'une recommandation stricte et d'une recommandation conditionnelle

Les implications d'une recommandation stricte sont les suivantes :

- pour les patients — la plupart des personnes dans votre situation souhaiteraient que cette recommandation soit suivie, seule une faible proportion ne le souhaiterait pas ; demander des explications si l'intervention n'est pas proposée ;
- pour les médecins — la plupart des patients devraient bénéficier de cette mesure ; et
- pour les politiques — cette recommandation peut être adoptée comme principe d'action dans la plupart des situations.

Les implications d'une recommandation conditionnelle sont les suivantes :

- pour les patients — la plupart des personnes dans votre situation souhaiteraient que cette recommandation soit suivie, mais un bon nombre ne le souhaiteraient pas ;
- pour les médecins — vous devez reconnaître que des solutions différentes conviennent selon les patients, et que vous devez aider chaque patient, pour parvenir à une décision compatible avec ses valeurs et préférences ; et
- pour les politiques — la prise de décision nécessitera un débat de fond faisant intervenir de nombreux acteurs.

B.2 Tableaux de classement des recommandations

Recommandation 1 :

Pour contribuer à prévenir les infections à transmission aérienne, une ventilation adéquate est nécessaire dans toutes les zones de soins des établissements de soins.

Population : établissements de soins

Intervention : ventilation

Facteur	Evaluation	Explication
Qualité des données	Modérée	Il existe peu de données probantes indiquant qu'une ventilation insuffisante soit associée à un risque d'infection accru (Gustafson et al., 1982 ; Bloch et al., 1985 ; Hutton et al., 1990 ; Calder et al., 1991).
Effets bénéfiques ou souhaités	Importants (parfois supérieurs aux inconvénients)	Réduit l'exposition des patients et des soignants aux noyaux de condensation. Qualité de l'air intérieur améliorée pour les patients et les soignants.
Inconvénients ou effets indésirables		Coûts liés à l'installation d'une ventilation appropriée dans un établissement de soins. Nécessité de suivre les procédures d'exploitation et de maintenance.
Coûts	De faibles à élevés.	Les coûts peuvent être faibles si une ventilation naturelle simple est utilisée, et que sa conception est bien adaptée aux données climatiques. Coût initial généralement élevé dans le cas d'une ventilation entièrement mécanique, d'une ventilation naturelle assistée ou d'une ventilation hybride (mixte).
Faisabilité	Selon le climat.	La ventilation mécanique et la ventilation hybride (mixte) sont réalisables sous tous les climats, mais leur application peut être limitée par les ressources disponibles. La ventilation naturelle assistée est réalisable sous presque tous les climats, la ventilation naturelle simple est réalisable y compris dans les pays disposant de ressources limitées.
Classement global	RECOMMANDATION STRICTE	
Besoin de recherche	Nécessité de déterminer les débits d'air requis pour la lutte contre l'infection en milieu de soins.	

Recommandation 2 :

Pour la ventilation naturelle, les débits de ventilation minimaux suivants doivent être assurés, en valeurs moyennes sur une heure :

- 160 l/s/patient (débit de ventilation moyen sur une heure) pour les chambres de précautions aériennes (avec un minimum de 80 l/s/patient) (attention : cette exigence ne s'applique qu'aux installations neuves ou aux rénovations de grande ampleur) ;
- 60 l/s/patient pour les chambres à usage général et les services de consultation externe ;
- 2,5 l/s/m³ pour les couloirs et autres lieux de passages ne comportant pas un nombre prédéterminé de patients ; toutefois, si des soins doivent être prodigués dans des couloirs, en situation d'urgence par exemple, les débits de ventilation doivent être les mêmes que ceux exigés pour les chambres de précautions aériennes ou les chambres à usage général.

La conception doit tenir compte des variations du débit de ventilation.

Lorsque la ventilation naturelle ne permet pas seule de satisfaire aux exigences de ventilation, il faut envisager d'autres systèmes de ventilation, comme les systèmes de ventilation naturelle hybride (mixte) et, si cela ne suffit pas, avoir recours à la ventilation mécanique.

Population : établissements de soins

Intervention : ventilation naturelle

Facteur	Evaluation	Explication
Qualité des données	Faible	Il n'y a pas de données probantes directes suggérant que la ventilation naturelle ait un impact direct sur la transmission de maladies, mais les données techniques montrent clairement que la ventilation naturelle peut assurer un débit de ventilation très élevé, et il est suggéré qu'un débit de ventilation élevé permet de réduire la transmission aérienne des infections (Menzies et al., 2000).
Effets bénéfiques ou souhaités	Modérés (parfois supérieurs aux inconvénients)	Convient aux climats doux à tempérés. Coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance modérés. Permet d'assurer un débit de ventilation très élevé. Larges possibilités de contrôle de l'environnement par les occupants..
Inconvénients ou effets indésirables		Facilement affecté par le climat extérieur. Etude prévisionnelle, analyse et conception plus difficile pour ce qui est du contrôle de la direction du flux d'air. Confort des occupants réduit par temps très chaud, humide ou froid. Inaptitude à établir une pression négative dans les zones d'isolement, mais une conception adaptée peut permettre d'y remédier ; dépend de la situation.
Coûts	De faibles à élevés.	Les coûts peuvent être faibles si une ventilation naturelle simple est utilisée, qu'elle est bien conçue et que les conditions climatiques sont favorables. Ils peuvent être plus élevés si une ventilation hybride (mixte) ou une ventilation naturelle assistée est utilisée.
Faisabilité	Selon les pays	La ventilation naturelle est moins facile à mettre en œuvre en conditions extrêmes (froid, chaleur, bruit, pollution extrêmes).

Classement global **RECOMMANDATION CONDITIONNELLE**

Besoin de recherche Nécessité de déterminer les exigences applicables à la ventilation naturelle dans le cadre de la lutte contre l'infection en milieu de soins, pour ce qui est de la variabilité du débit d'air et de la variabilité de la direction d'écoulement de l'air.

Recommandation 3 :

Lors de la conception d'établissements de soins ventilés naturellement, il faut veiller à ce que le flux d'air général amène l'air des sources d'agents vers des zones où la dilution est suffisante, et de préférence vers l'extérieur.

Population : établissements de soins.

Intervention : contrôle du flux d'air dans la ventilation naturelle

Facteur	Evaluation	Explication
Qualité des données	Faible	Il y a peu de données probantes attestant qu'une direction d'écoulement de l'air inadaptée soit associée à un risque accru d'infection (Gustafson et al., 1982 ; Bloch et al., 1985 ; Hutton et al., 1990 ; Calder et al., 1991).
Effets bénéfiques ou souhaités	Modérés (parfois supérieurs aux inconvénients)	Risques de transmission de chambre à chambre peut-être réduits.
Inconvénients ou effets indésirables		Difficultés au stade de la conception et de l'exploitation des systèmes de ventilation naturelle.
Coûts	De faibles à élevés	Coûts faibles si une ventilation naturelle simple est utilisée, qu'elle est bien conçue et que les conditions climatiques sont favorables. Peuvent être plus élevés si une ventilation hybride (mixte) ou une ventilation naturelle assistée est utilisée, ou si des mesures techniques complémentaires sont nécessaires pour contrôler l'orientation du flux d'air.
Faisabilité	Selon la conception et les possibilités de contrôle du flux d'air	La ventilation naturelle se prête moins bien au contrôle du flux d'air et exige une conception technique et architecturale bien étudiée.

Classement global **RECOMMANDATION CONDITIONNELLE**

Besoin de recherche Nécessité d'étudier les méthodes techniques et architecturales de contrôle du flux d'air dans les bâtiments ventilés naturellement.

Recommandation 4 :

Dans les espaces où sont réalisées des procédures générant des aérosols associées à la transmission d'agents pathogènes, les exigences relatives à la ventilation naturelle doivent correspondre au minimum à la recommandation 2. S'il s'agit d'agents aéroportés, les recommandations 2 et 3 doivent être appliquées.

Population : établissements de soins

Intervention : ventilation des espaces où sont réalisées des procédures générant des aérosols

Facteur	Evaluation	Explication
Qualité des données	Très faible	Des données indirectes montrent que certaines procédures générant des aérosols sont associées à un risque de transmission accru et que la ventilation peut jouer un rôle.
Effets bénéfiques ou souhaités	Modérés (parfois supérieurs aux inconvénients)	Risque infectieux éventuellement réduit.
Inconvénients ou effets non souhaités		Confort des occupants réduit par temps très chaud, humide ou froid.
Coûts	De faibles à élevés	Coûts faibles si une ventilation naturelle simple est utilisée. Peuvent être plus élevés si une ventilation hybride (mixte) ou une ventilation naturelle assistée est utilisée.
Faisabilité	Selon les pays	La ventilation naturelle est moins facile à mettre en œuvre en conditions extrêmes (froid, chaleur, bruit, pollution extrêmes).
Classement global	RECOMMANDATION CONDITIONNELLE	
Besoin de recherche	Nécessité de déterminer les exigences minimales applicables à la ventilation naturelle lors de procédures générant des aérosols, pour ce qui est de la variabilité du débit d'air et du contrôle de la direction d'écoulement de l'air.	

Annexe C Gouttelettes respiratoires

Selon Wells (1995), ce sont les noyaux de condensation qui servent de véhicule dans la transmission des affections respiratoires transmissibles par voie aérienne. Il s'agit de résidus de gouttelettes séchés pouvant contenir des agents pathogènes infectieux.

C.1 Formation et taille des gouttelettes

Les « gouttelettes », dans ce contexte, sont constituées principalement d'eau et d'inclusions diverses, selon leur mode de génération.

Les gouttelettes produites naturellement par les humains (lorsqu'ils respirent, parlent, éternuent ou toussent) renferment divers types de cellules (cellules épithéliales et cellules du système immunitaire, notamment), des électrolytes physiologiques contenus dans les mucosités et la salive (Na⁺, K⁺, Cl⁻, par exemple) et, potentiellement, divers agents infectieux (bactéries, champignons, virus, par exemple).

Dans le cas des gouttelettes générées artificiellement en milieu de soins (lors de l'aspiration trachéo-bronchique, par exemple), les principaux constituants incluent également de l'eau stérile contenant divers électrolytes (solution saline isotonique ou physiologique contenant Na⁺ et Cl⁻, par exemple) et, dans bien des cas, des molécules de médicaments (salbutamol pour les asthmatiques, par exemple).

Ces gouttelettes générées naturellement ou artificiellement peuvent varier tant par leur taille que par leur contenu. Les gouttelettes > 5 µm tendent à rester piégées dans le tractus respiratoire supérieur (oropharynx — régions du nez et de la gorge), alors que les gouttelettes ≤ 5 µm sont susceptibles d'être inhalées dans le tractus respiratoire inférieur (bronches et alvéoles pulmonaires).

Le terme de gouttelettes est souvent utilisé pour désigner les gouttelettes de diamètre > 5 µm qui tombent rapidement au sol par gravité et ne sont donc transmises que sur une distance limitée (≤ 1 m, par exemple). En revanche, le terme de noyaux de condensation s'applique aux gouttelettes de diamètre ≤ 5 µm qui peuvent rester en suspension dans l'air sur une longue période de temps et sont ainsi susceptibles d'être transmises à des distances > 1 m (Stetzenbach, Buttner & Cruz, 2004 ; Wong & Leung, 2004). D'autres études suggèrent des définitions légèrement différentes, et distinguent les « grosses » gouttelettes, les « petites » gouttelettes et les noyaux de condensation, de diamètre > 60 µm, ≤ 60 µm et < 10 µm respectivement (Tang et al., 2006 ; Xie et al., 2007). L'idée est que les aérosols produits naturellement et artificiellement contiennent des particules de tailles diverses dont les déplacements dépendent pour une part significative de facteurs environnementaux comme la gravité, la direction et la force des flux d'air présents, la température et l'humidité relative (qui affectent à la fois la taille et la masse des gouttelettes, du fait de l'évaporation).

Plusieurs études ont été menées sur le nombre et la taille des gouttelettes de salive et d'autres sécrétions dues aux activités respiratoires (Jennison, 1942 ; Duguid, 1945 ; Hamburger & Roberston, 1946 ; Loudon & Roberts, 1967 ; Papineni & Rosenthal, 1997 ; Fennelly et al., 2004) et d'excellentes revues ont été publiées (Nicas, Nazaroff & Hubbard,

2005 ; Morawska, 2006). Ces études et revues indiquent que la taille des noyaux de condensation dues aux éternuements, à la toux ou à la parole dépend probablement de leur processus de génération et des conditions environnantes. La distribution granulométrique réelle des gouttelettes dépend aussi de paramètres tels que la vitesse de l'air expiré, la viscosité du fluide et la voie suivie par le flux d'air (le nez, la bouche ou les deux) (Barker, Stevens & Bloomfield, 2001). On note en outre une grande variabilité individuelle (Papineni & Rosenthal, 1997 ; Fennelly et al., 2004).

Les êtres humains produisent des aérosols (gouttelettes) respiratoires lors de processus divers comme la respiration, la parole, la toux (figure C.1, A), lorsqu'ils éternuent (figure C.1, B) et même en chantant (Wong, 2003 ; Toth et al., 2004).



(A)

(B)

Source : photographies reproduites avec l'aimable autorisation de (A) Prof Gary S Settles, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Pennsylvania State University, PA, USA; et (B) Prof Andrew Davidhazy, School of Photographic Arts and Sciences, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, USA, respectivement.

Figure C.1 (A) Image strioscopique (visualisation utilisant la réfraction de la lumière due aux différences de densité de l'air) de la toux humaine, et (B) prise de vue d'un éternuement à la lampe à éclairs

Il y a une variation physiologique naturelle du volume et de la composition des aérosols ainsi générés entre les individus et, chez un même individu, lors de l'une ou l'autre de ces activités. Une infection peut accroître cette variabilité, qui peut elle-même varier lorsque le système immunitaire de l'hôte commence à répondre à l'infection. Ainsi, un patient atteint de varicelle n'a pas d'anticorps spécifiques du virus au début de l'infection, et la charge virale est beaucoup plus élevée et donc potentiellement plus transmissible durant la phase prodromique de l'infection, aiguë, fébrile, s'accompagnant de toux, que dans la phase ultérieure, où les anticorps spécifiques commencent à se développer.

Relativement peu d'études ont caractérisé le nombre, la taille et le contenu des gouttelettes générées naturellement ou artificiellement. En outre, en raison des variations individuelles, des études sur les gouttelettes générées naturellement seraient peut-être d'un intérêt limité et ne correspondraient pas nécessairement à ce que l'on appelle les « super-propagateurs » - des individus infectés capables d'en infecter beaucoup d'autres et qui sont à l'origine d'un nombre de cas secondaires beaucoup plus élevé que l'on en attendrait en moyenne. Cela peut être dû à une série de raisons, en particulier à une faible réponse immunitaire de l'hôte, à des affections ou à d'autres infections respiratoires concomitantes qui accroissent

le degré d'excrétion de l'agent infectieux, ou encore à des facteurs environnementaux favorables à la survie de l'agent infectieux (Bassetti, Bischoff & Sherertz, 2005).

Des données publiées suggèrent que l'éternuement pourrait produire jusqu'à 40 000 gouttelettes de 0.5–12 µm de diamètre (Cole & Cook, 1998 ; Tang et al., 2006) qui peuvent être expulsées à des vitesses atteignant 100 m/s (Wells, 1955 ; Cole & Cook, 1998) ; la toux peut produire jusqu'à 3000 noyaux de condensation, soit à peu près le même nombre que la parole pendant cinq minutes (Cole & Cook, 1998 ; Fitzgerald & Haas, 2005 ; Tang et al., 2006). Si les gouttelettes ont des tailles très variables, les plus grosses représentent la plus grande partie du volume total des gouttelettes respiratoires. Il serait souhaitable de disposer de plus de données sur le comportement des gouttelettes et leur dispersion dans les aérosols générés naturellement.

Les aérosols infectieux se forment par contact et mélange des gouttelettes avec l'air expiré, qui peut être porteur d'agents infectieux provenant du tractus respiratoire des patients. Diverses procédures médicales génèrent des aérosols, et certaines d'entre elles peuvent être associées à un risque accru de transmission d'agents pathogènes. Cependant, un grand nombre d'études parmi les plus récentes consacrées à ces procédures présentent des défauts méthodologiques interdisant d'utiliser leurs conclusions pour formuler des recommandations. Dans l'ensemble, le risque associé à de nombreuses procédures générant des aérosols n'est pas encore bien défini, et la compréhension de l'aérobiologie des procédures générant des aérosols pourrait évoluer à la lumière de prochaines études. Aux fins du présent guide, le terme de procédure générant des aérosols associée à une augmentation attestée du risque de transmission d'agents pathogènes renvoie aux gestes suivants chez des patients atteints d'une affection respiratoire aiguë :

- intubation et procédures connexes (ventilation manuelle, aspiration, notamment)
- réanimation cardio-respiratoire
- bronchoscopie
- chirurgie et autopsie.

C.2 Evaporation des gouttelettes

Dans son étude classique de la transmission aérienne, Wells (1934) a pu identifier la différence entre la transmission de maladies par de grosses gouttelettes et par voie aérienne. Il a observé qu'en conditions atmosphériques normales, les gouttelettes de diamètre inférieur à 100 µm se desséchaient complètement à environ 2 m du sol avant de tomber. Ce constat a permis de formuler la théorie de la transmission par gouttelettes et noyaux de condensation, selon la taille des gouttelettes infectées. La courbe d'évaporation et de chute des gouttelettes établie par Wells (figure C.2) est importante pour comprendre la transmission aérienne et la transmission par de grosses gouttelettes. L'étude de Wells a démontré en outre que les gouttelettes peuvent se transformer en noyaux de condensation par évaporation.

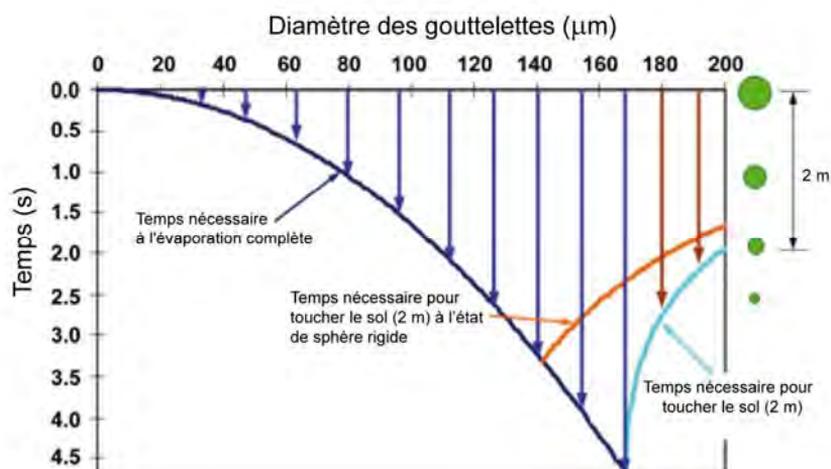


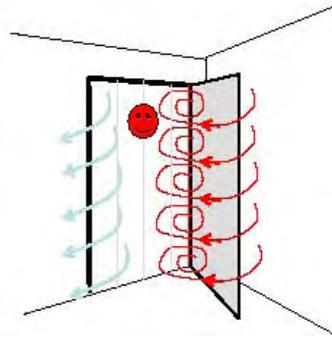
Figure C.2 Courbe d'évaporation et de chute des gouttelettes établie par Wells

C.3 Mouvements de l'air

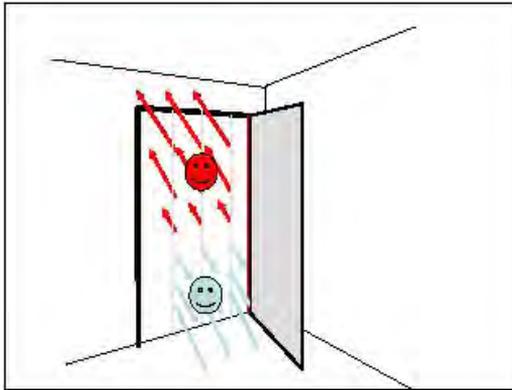
Les noyaux de condensation en suspension dans l'air peut être transportés par le mouvement de l'air. De l'air peut être entraîné dans les espaces voisins au cours des gestes les plus anodins, comme la marche, ou l'ouverture d'une porte entre une chambre et le couloir ou l'espace voisin (Hayden et al., 1998 ; Edge, Paterson & Settles, 2005 ; Tang et al., 2005, 2006). De plus, les différences de température (et donc de densité) de l'air de part et d'autre d'une porte créent un échange d'air entre les deux zones, et donc un second mécanisme d'afflux d'air dans les zones voisines (Tang et al., 2005, 2006) (figure C.3).



(A)



(B)



(C)

(A) Démonstration de la façon dont une personne se déplaçant entraîne de l'air dans son sillage (Tang et al., 2006). (B) Démonstration de la façon dont l'ouverture d'une porte peut faire passer de l'air de l'intérieur à l'extérieur d'une chambre d'isolement du simple fait de l'ouverture de la porte (Tang et al., 2005). (C) Démonstration de la façon dont une porte ouverte peut favoriser le mélange et l'échange de masses d'air présentant des températures et des densités différentes (Tang et al., 2005).

Figure C.3 Schémas d'échanges d'air liés aux gestes quotidiens

Même un patient s'asseyant simplement dans son lit ou à côté du lit crée des différences de température de l'air, du fait de sa température corporelle. Une température de l'air plus élevée directement au-dessus de la tête du patient (ou de son corps, s'il est allongé) créera des courants d'air convectifs qui peuvent entraîner de l'air potentiellement infectieux provenant des espaces voisins dans la colonne d'air chaud ascendant au-dessus du patient (Craven & Settles, 2006). Un patient alité, en respirant ou en dormant, peut produire des flux d'air expiré pouvant aller jusqu'à la zone respiratoire d'un patient dans le lit voisin, et même au-delà en présence de certains systèmes de ventilation (voir plus loin) (Qian et al., 2006). De la même façon, des dispositifs mécaniques tels qu'un ventilateur, une télévision ou un équipement médical peuvent perturber les flux d'air proches et disséminer l'air provenant des patients dans l'ensemble de la chambre ou de la salle.

Annexe D La notion de débit de ventilation

Un débit de ventilation peut s'exprimer sous forme soit de débit absolu, en l/s ou m³/s, soit de taux de renouvellement d'air rapporté au volume de l'espace. Dans ce guide, le débit de ventilation correspond au volume absolu d'air entrant par unité de temps (litre par seconde, ou l/s, mètre cube par heure, ou m³/h), et le taux de renouvellement d'air est la quantité relative d'air entrant par unité de temps. Ainsi, dans une chambre de précautions aériennes, un taux de renouvellement d'air de 12 par heure (12 RAH) est requis (CDC, 2005), alors que dans un bureau, le débit de ventilation exigé est de 10 l/s par personne.

La relation entre le débit de ventilation en l/s et le taux de renouvellement d'air est la suivante :

$$\text{Taux de renouvellement d'air} = \frac{[\text{débit de ventilation (l/s)} \times 3600 \text{ (s/h)}] \times 0,001 \text{ (m}^3\text{/s)}}{[\text{volume de la pièce (m}^3\text{)}]} \quad (\text{C.1})$$

ou

$$\text{Débit de ventilation (l/s)} = \text{taux de renouvellement d'air} \times \text{volume de la pièce (m}^3\text{)} \times 1000 \text{ (l/m}^3\text{)} / 3600 \text{ (s/h)} \quad (\text{C.2})$$

L'effet du débit de ventilation sur la qualité de l'air intérieur est lié à son impact sur la concentration de polluants atmosphériques, traduit par l'équation macroscopique simple décrivant la ventilation dans une seule pièce.

On considère une pièce où l'air est complètement mélangé — c'est-à-dire que la concentration de polluants est la même en tous points de la pièce. Lorsqu'il y a une source de polluants dans la pièce, l'équation régissant la concentration peut s'écrire comme suit :

$$V \frac{dc}{dt} = q(c_o - c) + \dot{V}_{pol} \quad (\text{C.3})$$

où :

V = volume de l'espace (m^3)

c = concentration (% ou kg/m^3)

q = débit de ventilation (m^3/s)

c_o = concentration d'air neuf (% ou kg/m^3)

dc = différence de concentration

dt = différence de temps

\dot{V}_{pol} = débit de génération des polluants dans la pièce (m^3/s ou kg/s).

L'équation (C.3), appelée équation de ventilation, montre la relation de base entre la concentration, le débit de ventilation, la concentration intérieure initiale, la concentration extérieure et le débit de génération des polluants. La solution générale de l'équation (C3) peut s'écrire

$$c = (c_o + c_G)(1 - e^{-nt}) + c_I e^{-nt} \quad (C.4)$$

où :

$$c_G = \frac{\dot{V}_{pol}}{q} = \text{concentration à la source}$$

c_I = concentration initiale à l'instant $t = 0$

n = taux de renouvellement d'air.

Le membre droit de l'équation (C.4) comporte deux parties. La première montre comment la concentration tend vers sa valeur d'équilibre, et la seconde, comment la concentration initiale décroît avec le temps. Après un temps suffisamment long, la seconde partie va diminuer tandis que la concentration de polluants tend vers la solution d'équilibre

$$c = c_o + \frac{\dot{V}_{pol}}{q} \quad (C.5)$$

Les solutions (C.4) et (C.5) montrent bien la différence entre débit de ventilation et taux de renouvellement d'air. Dans la solution (C.5), la concentration d'équilibre d'un polluant est déterminée par le débit de génération du polluant et le débit de ventilation (valeur absolue du flux de ventilation), mais pas par le taux de renouvellement d'air. Par conséquent, pour lutter contre l'exposition à long terme aux polluants, il importe de spécifier le débit de ventilation, et non le taux de ventilation. Dans la solution (C.4), si l'on se place dans la situation où la concentration décroît en l'absence de source de polluants constante (premier terme = 0), la vitesse de décroissance est fonction du taux de renouvellement d'air, et non du débit de ventilation. Par conséquent, pour réduire la concentration de polluant en peu de temps après une soudaine émission de polluant, c'est le taux de renouvellement d'air qui est déterminant.

La solution (C.5) peut être réécrite sous forme de relation entre la concentration intérieure et extérieure de polluants gazeux :

$$\text{Concentration intérieure} = \text{concentration extérieure} + \frac{\text{débit de génération de polluants}}{\text{débit de ventilation}} \quad (\text{C.6})$$

Cette relation est intéressante. Elle montre bien que :

- plus la concentration extérieure est élevée, plus la concentration intérieure l'est également
- plus le débit de ventilation est élevé, plus la concentration intérieure est faible
- plus le débit de génération de polluants est élevé, plus la concentration intérieure est élevée.

L'équation (C.6) est dérivée d'une équation d'équilibre simplifiée qui ne tient pas compte des différents processus d'élimination tels que la déposition sur des surfaces, la transformation par collision avec d'autres particules, les processus chimiques et la décomposition ou la perte de viabilité des organismes.

Les systèmes de ventilation peuvent être classés selon :

- leurs forces motrices — ventilation naturelle incluant l'infiltration, ventilation mécanique et ventilation hybride (mixte) ;
- les modes d'apport et d'extraction d'air — ventilation mécanique simple flux où seule l'alimentation ou l'extraction est mécanisée, ventilation mécanique double flux ;
- l'intégration à des systèmes de conditionnement d'air — systèmes à ventilo-convecteur et à induction, systèmes à volume d'air constant, systèmes à volume d'air variable, systèmes à simple conduit, systèmes à double conduit ; et
- les stratégies de distribution de l'air — ventilation par dilution et ventilation par déplacement.

Annexe E Démarche de détermination des exigences en matière de débit minimal de ventilation

La démarche de détermination du débit minimal de ventilation repose sur deux aspects principaux.

On considère tout d'abord l'effet du taux de renouvellement d'air sur la baisse de la concentration de noyaux de condensation. Le tableau E.1 indique la baisse de concentration établie par calcul pour différents taux de ventilation dans une chambre d'isolement où l'air est entièrement mélangé, en supposant que la concentration de polluant dans l'air extérieur est nulle et qu'il n'y a pas de source présente dans l'espace clos, selon l'équation simple de diminution de la concentration. Le tableau montre une dilution de 7 fois en 10 minutes pour un taux de renouvellement d'air (RAH) de 12, de 20 fois en 10 minutes pour un RAH de 18 et de 54 fois en 10 minutes pour un RAH de 24.

Tableau E.1 Baisse de la concentration de noyaux de condensation dans une chambre d'isolement en fonction du taux de ventilation et de la durée

Temps (minutes)	Taux de ventilation (RAH) (%)			
	6	12	18	24
0	100,00	100,00	100,00	100,00
10	37,00	13,50	4,98	1,83
20	13,50	1,83	0,25	0,03
50	0,67	0,00	0,00	0,00
60	0,25	0,00	0,00	0,00

RAH, renouvellements d'air par heure

On fait ensuite appel à une modélisation mathématique du risque d'infection en utilisant l'équation de Wells-Riley pour estimer l'effet du taux de ventilation sur la probabilité d'infection pour des affections connues transmises par voie aérienne. L'équation de Wells-Riley a pour objet de prédire la probabilité de transmission des maladies par voie aérienne.

On peut calculer le risque d'infection dans un espace clos selon le taux de ventilation et la génération de quanta. Le Tableau E.2 donne les résultats obtenus par calcul dans l'hypothèse d'un sujet infectant pénétrant dans une chambre fermée de 6 m × 6,7 m × 2,7 m sur une durée d'une heure. Le risque de transmission aérienne d'une infection d'un patient à un autre décroît lorsque le taux de ventilation augmente, en particulier si le débit de génération de quanta est faible ; or le débit réel de génération de quanta pour diverses infections à transmission aérienne est faible, en moyenne, d'après les données disponibles.

Les bénéfices liés à des taux de ventilation élevés sont évidents. En milieu de soins, où les noyaux de condensation sont un mode de transmission important, le débit moyen de production de quanta est généralement < 1 quantum/minute chez des patients symptomatiques non soumis à des procédures générant des aérosols, et de 4-6 quanta/minute lors d'une bronchoscopie. Pour un taux de production de 10 quanta/minute, le risque d'infection estimé pour 15 minutes d'exposition dans une pièce où le RAH est de 12 est égal à 4 %, alors qu'il est de 2 % si le RAH est de 24, ce qui illustre l'importance d'une ventilation adaptée.

Tableau E.2 Risque d'infection pour une exposition de 15 minutes selon le taux de ventilation et la génération de quanta lorsqu'un sujet infectant pénètre dans un espace clos de 6 m × 6,7 m × 2,7 m

Génération de quanta (quanta/min)	Taux de ventilation (renouvellements d'air par heure) (%)							
	1	3	6	12	15	18	24	30
1	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,10	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
3	0,14	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
4	0,19	0,07	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
5	0,23	0,08	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
6	0,27	0,10	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
7	0,30	0,11	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
8	0,34	0,13	0,07	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01
9	0,37	0,14	0,07	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
10	0,40	0,16	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
11	0,43	0,17	0,09	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02
12	0,46	0,19	0,10	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02
13	0,49	0,20	0,11	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02
14	0,51	0,21	0,11	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02
15	0,54	0,23	0,12	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03
16	0,56	0,24	0,13	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03
17	0,58	0,25	0,14	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03
18	0,61	0,27	0,14	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03
19	0,63	0,28	0,15	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03
20	0,64	0,29	0,16	0,08	0,07	0,06	0,04	0,04

Annexe F Ventilation naturelle, exemple I : hôpital Nacional Dos de Mayo, Lima, Pérou

Attention : La présentation des exemples des annexes F à I n'implique pas nécessairement que la conception des établissements décrits dans ce guide soit considérée comme efficace. Ces exemples ont été retenus parce que certains de leurs éléments architecturaux présentent un intérêt sous l'angle de l'amélioration de la ventilation naturelle. Pour évaluer l'efficacité d'une ventilation naturelle, les débits de ventilation doivent être mesurés sur une période d'un an, dans des conditions de climat et de fonctionnement variables, ce qui n'a été fait pour aucun des exemples présentés dans ces annexes.

F.1 Description et histoire de l'hôpital

L'hôpital Nacional Dos de Mayo, à Lima, est un hôpital public général. Fondé en 1538, c'était le premier hôpital du Pérou. En 1875, il a été transféré à son emplacement actuel, aux Barrios Altos, près du centre historique de Lima. Il compte 646 lits, et offre toutes les grandes spécialités médicales et chirurgicales, ainsi que des services de pédiatrie et d'obstétrique. Près de 14 500 patients y sont hospitalisés chaque année ; à cela s'ajoutent 240 000 consultations externes et 50 000 patients reçus aux urgences. L'hôpital emploie 248 médecins et 912 soignants non médecins. Il comporte un service renommé de pathologie infectieuse et de médecine tropicale. Les chambres accueillant les patients du service de pathologie respiratoire sont situées à l'étage, au-dessus de ce service, et comportent des lits pour les cas de tuberculose multirésistante. Les bâtiments de pathologie infectieuse et de médecine tropicale, construits dans les années 1950 à l'extrémité nord de l'hôpital, ont été conçus pour l'isolement des patients tuberculeux, selon les principes de conception des sanatoriums européens (figure F.1).



(A) L'hôpital Nacional Dos de Mayo

(B) Vue du service de pathologie infectieuse

Figure F.1 Hôpital Nacional Dos de Mayo

F.2 Principaux styles architecturaux de l'hôpital

Un grand nombre de bâtiments de l'hôpital actuel datent de son inauguration en 1875 et présentent les caractéristiques de l'architecture coloniale espagnole, avec de hauts plafonds (généralement 4,2 m ou plus), de grandes fenêtres et des lanterneaux pour l'éclairage et la ventilation. Les salles de médecine et de chirurgie — de grandes salles de type « Nightingale » comportant 40 lits — sont disposées autour d'un jardin central où les patients et le personnel peuvent se détendre. Le bâtiment hébergeant les salles réservées aux pathologies infectieuses et aux affections respiratoires, nommé Santa Rosa d'après la sainte patronne de Lima, est un immeuble de deux étages avec de hauts plafonds, de grandes fenêtres et des balcons permettant aux patients tuberculeux de prendre l'air (figure F.2). Une partie du rez-de-chaussée a été convertie en chambres d'isolement ventilées mécaniquement, en pression négative, pour les porteurs du VIH atteints de tuberculose.

Une série de constructions modernes ont été ajoutées en 1971. Elles comprennent le service des urgences, les services de pédiatrie et de chirurgie, les laboratoires et la radiologie. Ces bâtiments ont généralement de petites fenêtres et une faible hauteur sous plafond (2,9 m environ).

F.3 Ventilation naturelle dans les salles antérieures à 1950

La ventilation a été mesurée en utilisant le dioxyde de carbone comme gaz traceur. Les taux de renouvellement d'air par heure (RAH) indiqués au tableau F.1 ont été mesurés alors que toutes les fenêtres et les portes étaient ouvertes, sauf mention contraire.

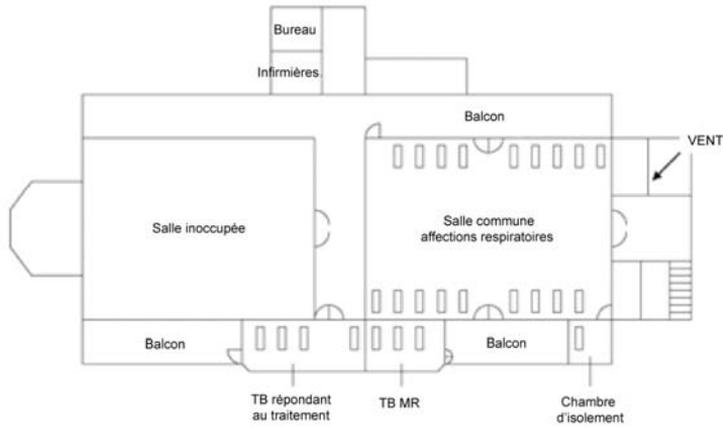
Les chambres des patients atteints d'affections respiratoires sont situées au premier étage, bien exposées aux vents dominants. Lima est une ville côtière, et les vents viennent du sud-ouest (du Pacifique). La salle commune pour les affections respiratoires, de 166 m², compte 18 lits bien espacés. La ventilation traversante y est excellente, avec des fenêtres sur les deux grands côtés, et quatre doubles portes.

Tableau F.1 Caractéristiques de la salle et renouvellements d'air mesurés par heure

Paramètres	Salle commune affections respiratoires	Salle TB répondant au traitement	Salle TB MR	Chambre d'isolement	Salle de soins
Surface (m ²)	166	51	35	11,7	23
Hauteur plafond (m)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
Surface totale fenêtres (m ²)	32,3	32,3	18,4	3,0	20,3
Surface ouvrable fenêtres (m ²)	12,5	22,0	12,3	3,0	19,6
Surface portes (m ²)	16,6 (<i>n</i> = 4)	9,2 (<i>n</i> = 2)	3,8 (<i>n</i> = 1)	2,0 (<i>n</i> = 1)	3,7
RAH moyen	25 (<i>n</i> = 26)	29 (<i>n</i> = 15)	33 (<i>n</i> = 42)	49 (<i>n</i> = 7)	51 (<i>n</i> = 7)

RAH, renouvellements d'air par heure ; TB, tuberculose ; MR, multirésistante

Note : les conditions climatiques lors de la mesure des taux de ventilation n'ont pas été communiquées ; les taux mesurés sont donc indicatifs (valeurs « instantanées », sur une courte période). La précision des mesures de RAH n'est pas connue.



(A) Plan des salles de pathologie respiratoire



(B) Salle commune de pathologie respiratoire



(C) Chambre TB répondant au traitement



(D) Chambre TB MR



(E) Emplacement de la chambre TB MR

MR, multirésistante

Figure F.2 Plan et photos de différentes salles/chambres de l'hôpital Nacional Dos de Mayo

La chambre pour les cas de tuberculose répondant au traitement a quatre lits ; elle est bien ventilée, la surface de la fenêtre et de la porte étant suffisamment importante par rapport au volume de la pièce, et ce bien que la chambre se trouve du côté du bâtiment protégé des vents dominants. On voit la façade de cette pièce au premier étage sur la figure F.1.

La chambre pour les cas de tuberculose multirésistante est voisine de la précédente. Bien qu'elle soit également du côté sous le vent, elle est mieux exposée aux vents dominants. Elle comporte trois lits. Les tests à la fumée ont démontré la permanence d'un flux d'air entrant par la porte et sortant par la fenêtre.

La chambre d'isolement est située près de la salle commune pour les affections respiratoires (figure F.2, A). La porte donne sur la salle commune, et trois fenêtres donnent sur l'extérieur. Porte fermée, on a mesuré un RAH de 23 en moyenne lorsque les trois fenêtres sont grandes ouvertes ($n = 3$). L'ouverture de la porte permettait d'assurer une ventilation traversante, avec un RAH moyen de 49 ($n = 7$). Les tests à la fumée ont démontré la permanence d'un flux d'air dirigé de la salle commune vers la chambre d'isolement et sortant par les fenêtres.

La salle de soins (non représentée) n'est pas utilisée actuellement, cette aile du bâtiment étant endommagée. De forme hexagonale, elle possède de grandes fenêtres sur cinq côtés, et de grandes portes sur le sixième côté, ce qui assure un flux d'air traversant. Cette pièce est située, elle aussi, du côté du bâtiment abrité du vent. La ventilation a fait l'objet de nombreux mesurages avec un nombre croissant de fenêtres et/ou de portes ouvertes.

F.4 Améliorations de la ventilation naturelle obtenues par des modifications simples

L'exemple d'amélioration de la ventilation naturelle présenté ici concerne la salle d'attente des consultations externes (figure F.3). Pour évaluer l'impact des interventions, on a mesuré le RAH tout d'abord dans la configuration d'origine (lanterneaux hermétiquement fermés à l'aide de feuilles plastiques, vitrages retirés et remplacés par des feuilles plastiques), puis on a retiré les éléments en matière plastique pour mesurer le RAH dans la nouvelle configuration.



(A)

(B)

(A) Photo de la salle d'attente des consultations externes. (B) Le taux de ventilation est passé de 6,5 RAH à 15 RAH en moyenne grâce à l'ouverture des lanterneaux dans la salle d'attente.

Figure F.3 Amélioration de la ventilation naturelle dans la salle d'attente des consultations externes à l'hôpital Nacional Dos de Mayo

La salle d'attente des consultations externes générales (incluant la plupart des spécialités médicales, la chirurgie et la psychiatrie) est située dans le grand hall représenté par la photo. Les salles de consultation sont disposées de part et d'autre de ce hall. L'entrée principale donne sur la rue et des portes du côté opposé de la salle conduisent à d'autres parties de l'hôpital (figure F.4). Jusqu'à 300 patients partagent cette salle aux heures de consultation du matin et de l'après-midi.

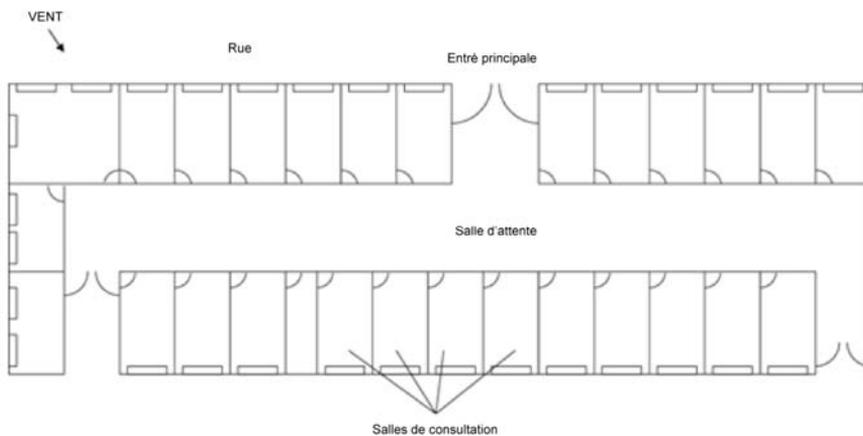


Figure F.4 Plan de la salle d'attente et des salles de consultation

Le toit de la salle d'attente comportait à l'origine quatre sections vitrées hermétiquement closes, dont deux de 14 m × 2,4 m et deux de 5 m × 2,4 m. Elles ont été rehaussées d'un mètre pour ménager une entrée d'air par le toit. La ventilation a été considérablement améliorée par cette mesure simple qui a coûté US \$ 1000 environ. Le taux de ventilation est passé de 5,5 RAH en moyenne lorsque les portes et les fenêtres étaient ouvertes à 15 RAH en moyenne avec l'ouverture des lanterneaux ($n = 4$).

Rappelons que ces exemples ont pour objet de présenter des études de cas d'hôpitaux ventilés naturellement dans le cadre de la lutte contre l'infection. Compte tenu de certaines caractéristiques (salles communes, absence de désinfection des mains par soluté hydro-alcoolique sur les photos, etc.), ces exemples ne correspondent pas toujours à une situation idéale.

Annexe G Ventilation naturelle, exemple II : hôpital Grantham, RAS de Hong Kong, Chine

G.1 Description et histoire de l'hôpital

Les chambres accueillant les patients tuberculeux à l'hôpital Grantham sont situées au septième étage. Elle sont ventilées naturellement depuis l'origine (construction de l'hôpital en 1957), et il n'a pas été installé de système central de conditionnement d'air, mais des ventilateurs de plafond sont utilisés en été (figures G.1 et G.2). Les fenêtres et les portes sont maintenues ouvertes en permanence. On reprendra ici une description de 1957 :

Dans la conception d'un hôpital pour patients tuberculeux, des locaux spacieux et aérés sont un impératif majeur, et c'est pourquoi le bâtiment principal a la forme d'une étroite barre verticale bien séparée du bâtiment de l'administration pour permettre un maximum de ventilation traversante. Il est orienté de façon à bénéficier de la brise d'été tout en étant abrité des vents froids en hiver. Exposé au sud-est, il est protégé du soleil en été.



Figure G.1 Chambres et fenêtres ouvertes dans le service des tuberculeux de l'hôpital Grantham



Figure G.2 Ventilateur de plafond en été, radiateur en hiver

G.2 Mesure des taux de ventilation naturelle

Deux campagnes de mesure des taux de ventilation naturelle ont été menées, les 9-10 novembre 2005 et le 28 août 2006. Chaque fois, les patients de quatre chambres pour tuberculeux étaient remplacés par des mannequins thermiques pour simuler les flux thermiques liés à la présence de patients hospitalisés. Chacun de ces mannequins génère un flux thermique de l'ordre de 76 watts (W), correspondant à un adulte au repos.

Pour mesurer le taux de renouvellement d'air, on a étudié la dissipation d'un gaz traceur (l'hexafluorure de soufre, SF₆) ; ce gaz était injecté dans la salle en continu jusqu'à ce que sa concentration se stabilise ; l'injection était alors interrompue et on mesurait la baisse de concentration du gaz. Deux ventilateurs électriques étaient utilisés pour mélanger l'air dans la pièce au cours des mesures. L'injection de SF₆ était contrôlée par un échantillonneur doseur multigaz de type 1303 et la concentration de SF₆ était mesurée à l'aide d'un analyseur monogaz 3425. Pour tenir compte de la difficulté à assurer un mélange homogène de l'air dans la pièce, la dissipation du gaz traceur était mesurée en deux points, le taux de ventilation indiqué correspondant à la moyenne des deux valeurs ainsi obtenues.

G.3 Taux de ventilation mesurés

Les taux de ventilation étaient mesurés dans différentes situations : portes et fenêtres ouvertes ou fermées, ventilateurs d'extraction en fonctionnement ou non. Au total, 20 tests ont été réalisés (tableau G.1 ci-après).

Le taux de ventilation augmentait lorsque le degré d'ouverture des fenêtres et des portes augmentait. Le taux moyen mesuré atteignait sa valeur maximale lorsque toutes les ouvertures étaient entièrement ouvertes. Lorsque toutes les ouvertures étaient fermées, le taux de ventilation dû aux seules infiltrations ne dépassait pas 0,71 (test n° 15). Lorsque les ouvertures donnant sur le couloir étaient entièrement ouvertes, les fenêtres donnant sur l'extérieur fermées et les ventilateurs d'extraction arrêtés, le taux de ventilation était de 8,7 renouvellements d'air par heure (RAH) (test n° 14).

L'obtention d'un taux de ventilation élevé dépend de la direction du vent, de la vitesse du vent et de l'alignement des deux orifices de ventilation avec la direction du vent dominant. C'est ce qui explique la différence entre les taux mesurés par les tests 4 et 17 dans la même pièce (figure G.3). La figure G.3 indique la température, la vitesse du vent et la direction du vent mesurées par l'observatoire de Hong Kong lors des tests. Le test n° 4 a été réalisé entre 15h19 et 15h30 le 9 novembre 2005, alors que la vitesse et la direction du vent étaient respectivement de 3,6 m/s et 150 ° à 15h00 et de 2,4 m/s et 170 ° à 16h00. Le test n° 17 a été réalisé entre 17h42 et 18h04 le 28 août 2006, alors que la vitesse et la direction du vent étaient respectivement de 4,1 m/s et 100 ° à 17h00 et 4,8 m/s et 90 ° à 18h00. Bien que la vitesse du vent soit nettement plus élevée lors du test n° 17 que lors du test n° 4, le taux de ventilation obtenu pour le test 17 (18,5 RAH) est nettement plus bas que pour le test 4 (42,2 RAH), ce qui tient à la direction du vent. L'angle entre la direction du vent et les portes et fenêtres pour le test n° 17 était inférieur à 10 °, alors qu'il atteignait presque 75 ° pour le test n° 4. Le flux efficace lié à la vitesse du vent entrant par les fenêtres était de $3,0 \times \sin(75^\circ) = 2,9$ m/s pour le test n° 4, alors qu'il était inférieur à $4,5 \times \sin(10^\circ) = 0,78$ m/s pour le test 17. Ces résultats montrent l'incidence de la vitesse et de la direction du vent sur le taux de ventilation.

Tableau G.1 Taux de ventilation mesurés dans les chambres pour patients tuberculeux

Test	Date	Chambre	Fenêtres /portes sur l'extérieur (% ouverture)	Porte donnant sur le couloir (% ouverture)	Ventila-teur	Type de chambre	RAH
1 ^a	9 nov	Boxe 7;	100	100	arrêt	2 lits	30,3
2	2005	6/F	100	fermée	arrêt	2 lits	17,6
3			50	fermée	arrêt	2 lits	14,6
4		Boxe 4;	100	100	arrêt	2 lits	42,2
5		6/F	100	fermée	arrêt	2 lits	15,4
6			50	fermée	arrêt	2 lits	10,7
7			100	fermée	arrêt	2 lits	22,5
8 ^b	10 nov	Boxe 0;	100	100	arrêt	2 lits	60,2
9	2005	2/F	100	fermée	arrêt	2 lits	16,0
10			50	fermée	arrêt	2 lits	12,9
11 ^b		Boxe 7;	100	100	arrêt	5 lits	69,0
12		2/F	100	fermée	arrêt	5 lits	31,6
13			50	fermée	arrêt	5 lits	23,5
14			fermées	100	arrêt	5 lits	8,70
15	28 août	Boxe 4;	fermées	fermée	arrêt	2 lits	0,71
16	2006	6/F	100	100	arrêt	2 lits	14,0
17			100	100	arrêt	2 lits	18,5
18			fermées	fermée	marche	2 lits	12,6
19			100	100	marche	2 lits	14,6
20			100	100	marche	2 lits	29,2

RAH, renouvellements d'air par heure.

^a Conditionneur d'air en service au niveau de la fenêtre durant le test.

^b Tests 8 et 11 : taux de ventilation trop élevés pour que les données recueillies soient fiables.

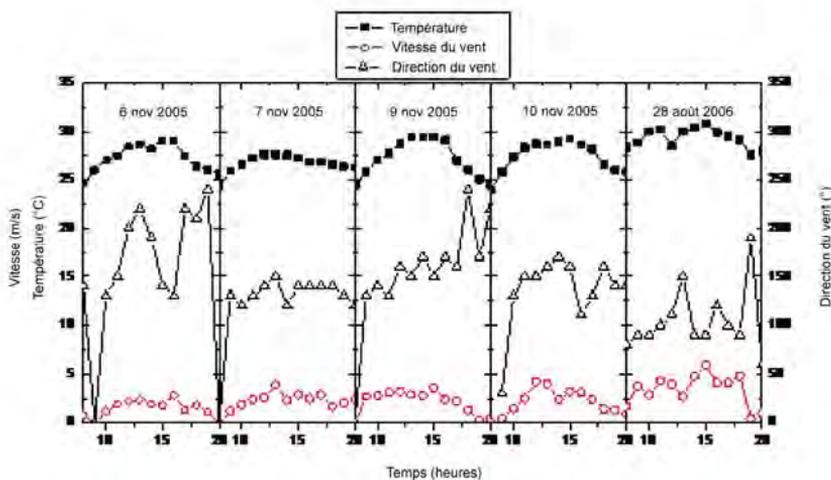


Figure G.3 Température ambiante, vitesse et direction du vent relevées par l'observatoire de Hong Kong (station météorologique de Wong Chuk Hang, proche de l'hôpital Grantham)

Ces résultats montrent combien il est important de tenir compte de l'incidence de la direction et de la vitesse du vent sur le taux de ventilation. Les concepteurs doivent identifier les conditions dominantes ou moyennes, et concevoir les bâtiments en fonction de ces données. Le présent guide est destiné à être utilisé dans des conditions climatiques très diverses, dans des contextes économiques très différents, et sur des sites présentant une infinité de caractéristiques topographiques et de variables de toutes sortes. Il importe que les concepteurs des bâtiments, les responsables des établissements et les personnes chargées de gérer les entrées et les sorties d'air dans les espaces critiques pouvant contenir des agents infectieux tiennent compte de ces divers paramètres.

Annexe H Ventilation naturelle, exemple III : Unité de lutte contre la tuberculose, hôpital Tan Tock Seng, Singapour

Les services de consultation externe de l'Unité de lutte contre la tuberculose comprennent la clinique de diagnostic, où les patients atteints de tuberculose sont évalués et traités, et la clinique de dépistage et de suivi des personnes en contact avec les tuberculeux. Le service d'hospitalisation de l'Unité comprend 20 lits pour des patients généralement accueillis en long séjour, ne bénéficiant pas d'un soutien social et familial satisfaisant, ou faisant l'objet d'une obligation légale de traitement en milieu hospitalier. Le personnel du service compte de deux à quatre infirmiers et un auxiliaire de soins ; l'activité est organisée sur trois postes par 24 heures. Le personnel médical et infirmier ne porte généralement pas de masque dans le service.



Figure H.1 Deux vues du service d'hospitalisation des patients tuberculeux ; le périmètre du bâtiment à un seul niveau est dégagé pour permettre une ventilation naturelle tout au long de l'année

Le bâtiment possède un long toit en pente surplombant les fenêtres sur chaque côté ; les fenêtres à lames sont maintenues ouvertes. La ventilation naturelle due au vent peut être assurée selon plusieurs axes d'écoulement de l'air. De nombreux ventilateurs de plafond assurent en outre le rafraîchissement de l'air. Les salles pour hommes et femmes sont séparées en deux zones entre lesquelles se trouvent les espaces de travail des soignants (figure H.2).

Le taux d'occupation du service est généralement de l'ordre de 80 %. Les lits sont espacés de 1,35 m environ, mais les patients sont libres de se déplacer dans le service et de s'asseoir à l'extérieur, où une vaste zone couverte est aménagée à l'entrée du bâtiment. La zone de bureau du personnel (non représentée), située à l'opposé de l'entrée principale, est séparée du reste du service par des cloisons incomplètes, plutôt que par des portes. La porte à l'arrière du bâtiment peut être ouverte pour favoriser l'écoulement de l'air d'une

extrémité à l'autre du service, et les fenêtres à lames assurent un flux traversant transversal (figure H.3).

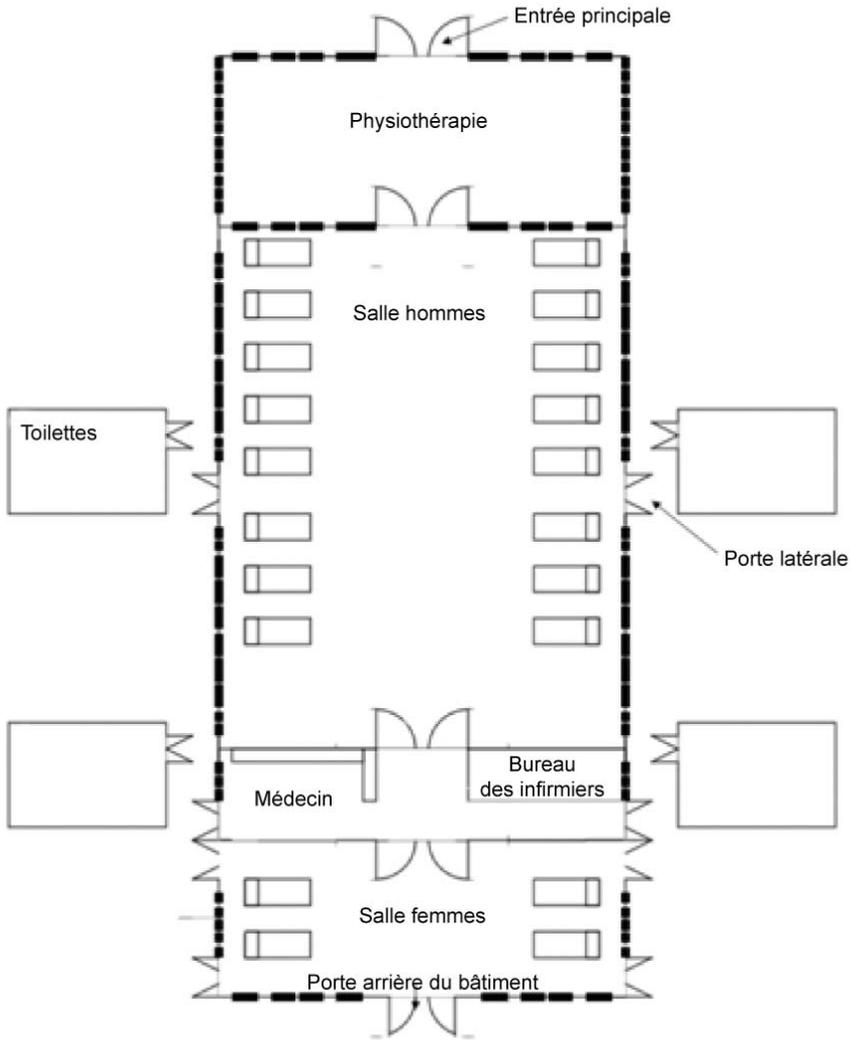


Figure H.2 Plan du service d'hospitalisation des patients tuberculeux



(A)

(B)

(A) Les cloisons latérales sont incomplètes, laissant une grande hauteur libre entre le haut de la cloison et le toit. (B) La ventilation est améliorée par une grande hauteur sous plafond et de nombreux ventilateurs de plafond.

Figure H.3 Salle d'hospitalisation des patients tuberculeux : vues de l'intérieur

La ventilation naturelle est utilisée depuis plus de 50 ans dans l'Unité de lutte contre la tuberculose de Singapour. Bien que l'Unité soit proche du centre ville, dans une ville moderne et très peuplée, c'est un espace ouvert, spacieux et agréable pour les patients. La ventilation assurée par le vent, tant dans le service de consultation externe que dans le service d'hospitalisation, permet — dans toutes les zones où peuvent se trouver des patients potentiellement infectieux — un renouvellement d'air destiné à maintenir la qualité de l'air ambiant, tant pour le personnel que pour les patients.

On ne dispose pas de données mesurées sur la ventilation de cet établissement.

Annexe I Ventilation naturelle, exemple IV : Centre d'isolement de Damak, Népal

L'organisation internationale pour les migrations (OIM) possède à Damak un centre de rétention accueillant des migrants dont le dossier est en cours de traitement par l'OIM, et qui font l'objet d'une surveillance sanitaire. Les unités d'isolement voisines du centre permettent d'isoler toute personne testée positive pour une maladie infectieuse ou présentant des symptômes de maladie infectieuse.

Le site (figure I.1) et les différents bâtiments (figure I.2) sont conçus pour assurer un environnement sûr et protégé aux personnes isolées et à celles qui sont en contact avec des personnes infectées, dans le cadre des soins ou pour d'autres raisons. La conception des unités d'isolement doit garantir la sécurité des occupants vis-à-vis du risque de transmission d'infection par voie aérienne, notamment dans le cas des migrants chez lesquels une maladie infectieuse a été diagnostiquée.



Figure I.1 Le centre de rétention de l'OIM à Damak



Figure I.2 Unité d'isolement individuelle (à gauche) et espace libre entre le haut du mur et le toit pour permettre la ventilation naturelle (à droite)

Les unités ont trois fenêtres, et une hauteur libre de 0,8 m est ménagée entre le haut du mur et l'avant-toit. Un extracteur éolien est installé au sommet du toit pour accroître le taux de ventilation et assurer l'ascension de l'air. Toutefois, ce dispositif ne s'est pas révélé efficace.

Les unités sont conçues pour être occupées par une seule personne, et sont équipées d'une douche. Des latrines communes sont installées sur le site.

La conception d'ensemble est destinée à optimiser la ventilation naturelle en assurant un tirage constant, l'air neuf devant pénétrer par les fenêtres et sortir sous l'avant-toit et par l'extracteur éolien.

Ce type d'unité est facile à construire et peut être réalisé n'importe où avec les matériaux disponibles sur place. Si l'espace entre le haut du mur et le toit garantit une ventilation efficace en toute saison, il peut aussi laisser entrer l'eau dans l'unité, en cas de fortes pluies.

Le surplomb du toit devrait être augmenté (de 450 à 1000 mm) pour que les patients puissent laisser les fenêtres ouvertes pendant la saison des pluies sans que l'eau pénètre dans l'unité en cas de forte pluie.

Le responsable de la conception de ces unités à l'OIM prévoit de fixer sur le pourtour du toit une jupe en polypropylène d'un mètre de large environ, qui assurera une protection en cas de pluie battante sans affecter notablement la ventilation du bâtiment.

Compte tenu de la ventilation naturelle que permettraient de grandes fenêtres (les fenêtres actuelles semblent trop petites), l'extracteur éolien et l'ouverture au sommet du toit ne sont peut-être pas nécessaires.

La surface limitée du site implique que les neuf unités réalisées sont relativement proches les unes des autres. Un espacement plus grand entre les unités (qui serait possible sur un site légèrement plus spacieux) contribuerait à renforcer la circulation d'air et le renouvellement d'air entre les unités, limitant ainsi le risque de transmission aérienne d'une unité à l'autre.

Ce document est le fruit d'une collaboration entre les Unités OMS Eau, assainissement et santé et Réduction des biorisques et agents pathogènes dangereux ; adresses Internet :
http://www.who.int/water_sanitation_health/en/
<http://www.who.int/csr/bioriskreduction/en/>

Une ventilation bien conçue peut réduire la transmission d'infections en milieu de soins, et la ventilation naturelle constitue parfois une mesure environnementale efficace pour faire obstacle à la propagation d'infections. Lorsque l'environnement s'y prête, la ventilation naturelle peut être la solution retenue pour réduire les risques infectieux dans le secteur de la santé.

Après une définition de la ventilation et de la ventilation naturelle, le présent guide analyse les exigences auxquelles doit satisfaire la ventilation naturelle dans le contexte de la lutte contre les infections, et expose les principes généraux de conception, de construction, d'exploitation et de maintenance applicables pour que les systèmes de ventilation naturelle soient un instrument efficace de lutte contre l'infection dans les établissements de soins.

Ce guide s'adresse aux praticiens et aux soignants chargés de la lutte contre l'infection, ainsi qu'aux professionnels de santé, ingénieurs et architectes intervenant dans le domaine de la réduction des risques biologiques au sein des structures de santé.

Pour plus d'informations, consulter <http://www.who.int/csr/en/> et suivre les liens « natvent ».

