

**Le Directeur général**

Maisons-Alfort, le 9 juin 2009

## AVIS

### de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

**Relatif à « l'évaluation du risque sanitaire pour l'homme lié à la présence de virus  
*Influenza* pandémique dans l'air des bâtiments et sa diffusion éventuelle par les  
dispositifs de ventilation »**

**Saisine Afsset n° « 2006/003 »**

---

*L'Afsset a pour mission de contribuer à assurer la sécurité sanitaire dans le domaine de l'environnement et du travail et d'évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter. Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques, ainsi que l'expertise et l'appui technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque.*

### **Présentation de la question posée**

L'Afsset a été saisie le 5 avril 2006 par le Délégué interministériel à la lutte contre la grippe aviaire (DILGA), d'une demande d'évaluation des risques sanitaires liés à la présence de virus *Influenza* pandémique dans l'air des bâtiments.

Cette évaluation devra prendre en compte les spécificités techniques des diverses technologies, telles que le recyclage, le traitement ou la climatisation de l'air.

A l'issue de ce travail, l'Agence devra proposer des recommandations visant à limiter la diffusion des virus dans les bâtiments via les systèmes de ventilation, et ce, en fonction des différentes situations définies dans le plan gouvernemental. L'Agence devra également identifier les besoins de recherche dans ce domaine.

Par ailleurs, il est demandé à l'Agence d'apprécier, d'une part, les capacités potentielles des laboratoires à mesurer le virus *Influenza* dans l'air, d'autre part, la pertinence de recourir à des dispositifs de traitement d'air susceptibles d'abaisser l'exposition des populations dans les locaux.

### **Contexte**

Devant la survenue possible d'une pandémie grippale, l'Organisation mondiale de la santé a élaboré dès 1999 les grandes lignes d'un plan de préparation à une telle pandémie, lesquelles devront servir de base aux États membres pour rédiger un plan national adapté aux réalités locales.

Le gouvernement français a arrêté en octobre 2004 son plan de prévention et de lutte contre une pandémie grippale. Celui-ci a pour principal objectif de protéger la population contre une pandémie grippale. Il vise également à préserver la continuité de la vie sociale et économique pendant cette période critique. Ce plan est régulièrement actualisé en fonction des avancées scientifiques et des enseignements tirés des exercices nationaux.

La situation d'alerte pandémique que connaît actuellement notre pays, causée par la diffusion du virus *Influenza A* de sous-type H1N1 démontre, s'il en était besoin, l'utilité d'un tel plan. En outre, l'épisode de contamination par le virus du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS) survenu en 2003 dans des bâtiments collectifs à Hong Kong, soulève la question de la transmission des virus par le biais des systèmes de ventilation.

## Organisation de l'expertise

L'Afsset a confié l'instruction de cette saisine aux deux Comités d'Experts Spécialisés (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » et « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques », lesquels ont mandaté le groupe de travail « Virus *Influenza* pandémique - ventilation » pour la réalisation des travaux d'expertise.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement aux CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et des éléments complémentaires transmis par les membres des deux CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise », avec pour objectif le respect des points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

## Avis

Pour formuler son avis, l'Afsset a tenu compte des conclusions et des recommandations formulées par le groupe de travail et les deux CES, mais également des avis divergents de cinq experts de ces mêmes CES. Ces avis divergents sont mentionnés dans la note d'expertise collective incluse dans le rapport d'expertise.

Il est généralement admis par la communauté scientifique que le virus de la grippe peut se transmettre d'un individu à l'autre par contact physique entre individus, par la projection de gouttelettes et/ou d'aérosols provenant des voies respiratoires d'un individu infecté, ou par contact indirect par l'intermédiaire d'objets contaminés.

A la question posée par le DILGA, « le virus de la grippe peut-il se transmettre à distance et éventuellement par les dispositifs de ventilation », l'Afsset souligne qu'il existe peu de données expérimentales et épidémiologiques exploitables permettant de répondre directement à la question.

Cependant, l'analyse de ces études suggère que les individus émettent lors de la parole, de la toux ou des éternuements, des particules infectées ou non, sous forme de gouttelettes et/ou d'aérosols. Les gouttelettes sédimentent très rapidement, mais les aérosols peuvent rester en suspension dans l'air pendant un certain temps. Ces aérosols peuvent être transportés à distance, notamment par les systèmes de ventilation.

Considérant que :

- ▶ ces aérosols peuvent être contaminés par le virus de la grippe,

- ▶ les conditions de température et d'humidité régnant dans l'atmosphère des bâtiments collectifs peuvent être favorables à la survie du virus pendant plusieurs heures,

l'Afsset estime que si les conditions de transport et de survie du virus de la grippe sont réunies, sa transmission à distance est envisageable. Cependant, la conservation du pouvoir infectant du virus dans les aérosols n'a pas été évaluée au delà de 2 à 3 mètres. Par manque de données expérimentales et épidémiologiques, des divergences d'opinions existent entre les experts, quant à la possible transmission du virus *via* les aérosols, au delà de cette distance.

Les principaux systèmes de ventilation installés dans les bâtiments français, recensés par le groupe de travail sont les suivants :

- la ventilation naturelle par ouvrants extérieurs ou par conduits à tirage naturel, équipe la plupart des immeubles d'habitation ;
- la ventilation mécanique contrôlée simple flux est présente dans les habitats individuels et collectifs ainsi que dans les bâtiments du secteur tertiaire ;
- la ventilation mécanique contrôlée double flux est essentiellement présente dans les bâtiments du secteur tertiaire ;
- les systèmes de ventilation dotés d'une centrale de traitement d'air, avec ou sans recyclage d'air, sont utilisés notamment dans les bâtiments du secteur tertiaire, tels que les hypermarchés, les centres commerciaux et les immeubles de bureaux.

Il est à noter que le fonctionnement constaté de ces dispositifs ne correspond pas toujours au fonctionnement théorique et que le cheminement de l'air dans les bâtiments n'est pas toujours conforme aux prévisions.

Compte-tenu des résultats de l'expertise, l'Afsset souligne que :

- ▶ les bâtiments dotés d'une ventilation naturelle ou d'une ventilation mécanique contrôlée sans recyclage d'air ne présentent pas, *a priori*, de risques de diffusion du virus de la grippe d'une pièce à l'autre.
- ▶ les bâtiments climatisés, dotés d'une centrale de traitement d'air avec recyclage pourraient, en théorie, présenter un certain risque de diffusion du virus dans toutes les parties du bâtiment alimentées par la centrale. Cependant, ce risque est difficile à évaluer, car il dépend de nombreux facteurs non maîtrisés tels que la virulence de la souche de virus, la concentration des particules dans l'air, l'aérodynamique et l'efficacité des systèmes de filtration, etc.

Il est à noter que dans les bâtiments collectifs dotés d'une centrale de traitement d'air le bénéfice d'un arrêt du recyclage de l'air sur la transmission du virus, n'est pas établi. Cela ne saurait donc justifier d'imposer aux occupants des bâtiments une dégradation majeure de la qualité de l'air (température, hygrométrie, polluants de l'air, etc.).

Par ailleurs, la résistance du virus de la grippe diminue lorsque la température ou l'hygrométrie augmentent. Cependant les experts estiment qu'il n'est pas opportun de fonder une recommandation sur ces paramètres, dont l'efficacité serait incertaine.

**En conclusion, tenant compte de ces éléments et en l'absence de connaissance sur la virulence et la dose infectante d'un futur virus *Influenza A* pandémique, l'Afsset estime que bien que celle-ci ne soit pas le mode de transmission majoritaire du virus de la grippe, la transmission par aérosols à distance ne peut être exclue dans les bâtiments équipés d'une ventilation munis d'un système de recyclage de l'air.**

## Recommandations

### ■ En période pré-pandémique (niveau d'alerte 1 à 5)

#### ▶ Mesures de gestion des systèmes de ventilation

Il importe de maintenir les systèmes de ventilation et de climatisation en état de fonctionnement optimal. Aussi, l'Afsset recommande aux gestionnaires :

- d'établir et de tenir à jour un schéma descriptif détaillé des installations de ventilation et de distribution d'air dans les bâtiments ;
- de veiller à l'entretien régulier des systèmes de ventilation ;
- de vérifier leurs performances et la qualité du renouvellement de l'air ;
- de remédier à tout dysfonctionnement ;
- de tenir à jour un registre d'entretien mis à disposition des autorités sanitaires ;
- de procéder à des essais de passage en tout air neuf, dans les bâtiments dotés d'une centrale de traitement d'air avec recyclage d'air.

#### ▶ Mesures destinées aux occupants de tout type de bâtiment

Il serait souhaitable de rappeler au public que des mesures simples peuvent être prises afin de faciliter le renouvellement de l'air dans les bâtiments : aérer régulièrement les pièces, ne pas obturer les entrées d'air, ni les bouches d'extraction.

### ■ En période pandémique (niveau d'alerte 6)

Il convient d'envisager les mesures dans l'ordre d'efficacité prioritaire suivant :

#### 1 - Mesures générales de protection sanitaire des personnes

L'Afsset rappelle qu'en période pandémique, l'application des mesures de protection sanitaire individuelle préconisées par le plan national de prévention et de lutte « pandémie grippale » est primordiale, notamment en matière d'hygiène respiratoire, telle que le lavage régulier des mains et le port du masque chirurgical pour les sujets présentant des signes d'infection respiratoire.

#### 2 - Mesures générales de prévention pour les occupants de bâtiments collectifs

- Inciter les personnes contaminées ou potentiellement contaminées à ne pas fréquenter les bâtiments publics et les immeubles de bureau ;
- éviter les rassemblements dans une même pièce (favoriser le télétravail et les réunions téléphoniques) ou à défaut, préconiser une distance de sécurité d'au moins 2 mètres entre chaque personne.

#### 3 - Mesures particulières relatives à la circulation de l'air dans les bâtiments

Ces mesures ont pour but premier de diminuer la concentration du virus dans l'air ambiant en le diluant.

- Aérer plusieurs fois par jour en ouvrant les fenêtres dix minutes ;
- En plus, dans les bâtiments dotés de ventilation mécanique simple ou double flux, maintenir la ventilation et fermer les portes ;
- Dans le cas des bâtiments collectifs équipés d'une centrale de traitement de l'air (climatisation centralisée), maintenir l'apport d'air extérieur et arrêter, si possible sans autre inconvénient, le recyclage. Cependant, lorsque le découplage du recyclage n'est pas possible, il convient de maintenir le fonctionnement complet de la centrale de traitement de l'air.

Par ailleurs, il est recommandé pour le personnel de maintenance des systèmes de ventilation :

- de porter un masque de type FFP2 et des gants jetables en cas d'intervention sur un système de ventilation ;
- de noter que l'efficacité d'une décontamination des conduits aérauliques n'a pas été prouvée en cas de découverte de cas de grippe dans un bâtiment.

## Questions complémentaires à la saisine

- ▶ Capacité des laboratoires à procéder à des mesures de virus *Influenza* dans l'air

Les laboratoires capables de réaliser des prélèvements d'air ponctuels à l'aide de biocollecteurs étant actuellement très peu nombreux, ceci exclue la possibilité de réaliser de tels prélèvements à grande échelle, en période de pandémie. De même, la surveillance en continu de la contamination de l'air, dans un but d'alerte en temps réel, n'est pas techniquement réalisable actuellement.

- ▶ Efficacité des systèmes d'épuration de l'air

L'Afsset ne recommande pas particulièrement l'installation dans les bâtiments de systèmes autonomes de traitement de l'air, visant à diminuer ou inactiver les virus dans l'air (filtration par filtres biocides ou électrostatiques, ionisation, photocatalyse, rayonnement UV, plasma froid, etc.), dont l'efficacité épuratoire n'a pas été démontrée dans les bâtiments.

- ▶ Besoins de connaissances identifiés

Eu égard au manque de connaissances, l'Afsset recommande de favoriser la recherche dans les domaines suivants :

- meilleure connaissance des modes de transmission des virus *Influenza A* chez l'homme ;
- transmission à distance du virus *Influenza A*, en situation expérimentale et sur site ;
- survie des virus *Influenza A* dans l'environnement (air, surfaces, etc.) ;

- comportement des virus dans les aérosols ;
- mesures d'efficacité des épurateurs d'air au sein des bâtiments ;
- développement de méthodes permettant d'étudier les phénomènes aérauliques inhérents aux systèmes de ventilation et notamment les cheminements de l'air au sein des bâtiments ; étude et évaluation de l'arrêt du recyclage de l'air dans les bâtiments dotés d'une centrale de traitement d'air ;
- recherche et développement de systèmes intégrés de détection en continu de virus *Influenza A* dans l'air.

**Le Directeur général**



Martin GUESPEREAU

## EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

### Relatives à la saisine « Évaluation du risque sanitaire pour l'homme lié à la présence de virus *Influenza* pandémique dans l'air des bâtiments et sa diffusion éventuelle par les dispositifs de ventilation

Saisine Afsset n° « 2006/003 »

---

Ce document synthétise les travaux du groupe de travail « Virus *Influenza* pandémique - ventilation » et présente les éventuels compléments des Comité d'Experts Spécialisés « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » et « Évaluation des risques liés aux eaux et agents biologiques ».

---

### Présentation de la question posée

L'Afsset a été saisie le 5 avril 2006 par le Délégué interministériel à la lutte contre la grippe aviaire (DILGA), d'une demande d'évaluation des risques sanitaires liés à la présence de virus *Influenza* pandémique dans l'air des bâtiments, en tenant compte des différentes technologies et de leurs spécificités techniques, telles que le recyclage, le traitement ou la climatisation de l'air. A l'issue de ce travail, il est demandé à l'agence d'émettre des recommandations afin d'éviter la diffusion de ces virus dans les bâtiments en fonction des situations distinguées dans le plan gouvernemental. Il est également demandé d'identifier les besoins de recherche.

Outre cette évaluation des risques, le DILGA a sollicité l'Agence afin d'apprécier d'une part, les capacités potentielles des laboratoires à procéder à des mesures de quantités de virus *Influenza* dans l'air, d'autre part, la pertinence de recourir à des dispositifs mobiles, ou non, de traitement d'air dans les locaux, susceptibles d'abaisser l'exposition des populations.

### Contexte scientifique

Devant la menace de la survenue d'une pandémie grippale, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a élaboré en 1999 les grandes lignes d'un plan de préparation à une pandémie de grippe. Elle a demandé à chaque État membre de s'en inspirer pour la rédaction d'un plan national, adapté au système de santé en place et aux réalités locales. Ce plan a été révisé en 2005, pour prendre en compte la transmission à l'homme du virus grippal d'origine aviaire de sous-type H5N1, faisant craindre l'émergence d'un nouveau virus capable de déclencher une pandémie.

Le gouvernement français a arrêté en octobre 2004 un plan de prévention et de lutte contre une pandémie grippale qui a été actualisé en 2006, 2007, puis 2009, en fonction des avancées scientifiques et techniques, ainsi que des enseignements tirés des exercices nationaux. Ce plan, placé sous la responsabilité du DILGA a pour objectif de protéger la population en métropole et en outre-mer, ainsi que les ressortissants français à l'étranger, contre une menace de pandémie grippale. Il vise également à préserver la continuité de la vie sociale et économique pendant la phase pandémique.

## Organisation de l'expertise

L'Afssset a confié aux Comités d'Experts Spécialisés (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » et « Évaluation des risques liés aux eaux et agents biologiques » l'instruction de cette saisine. Ces derniers ont mandaté le groupe de travail « Virus *Influenza* pandémique- ventilation » (VIP-ventilation) pour la réalisation des travaux d'expertise.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement aux CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres des CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

## Description de la méthode

Considérant que les caractéristiques structurales et pathogéniques d'un nouveau virus *Influenza* pandémique ne sont pas connues au moment de la rédaction de ce rapport et qu'elles resteront inconnues jusqu'à l'émergence de ce virus, le groupe de travail a basé son expertise sur la propagation et la virulence des virus *Influenza* actuellement connus, ainsi que sur des hypothèses relatives à un futur virus dont le potentiel de virulence pourrait être élevé.

En outre, compte tenu des nombreuses typologies d'établissement recevant du public, les experts ont basé leur analyse sur quelques exemples : les hypermarchés, les immeubles de bureaux et les logements collectifs.

Le groupe de travail a effectué une revue des articles scientifiques et techniques, complétée par des auditions d'experts dans les domaines de l'épidémiologie et des systèmes de ventilation, afin de répondre à la question posée.

## Résultats de l'expertise collective

### Généralités sur les virus *Influenza* A - Émergence d'un virus pandémique

Les virus *Influenza* A peuvent être responsables de pandémie de grippe, comme cela fut le cas en 1918, 1957 et 1968. Les mécanismes impliqués dans le déclenchement d'une pandémie grippale ne sont pas complètement connus. La survenue de cet événement dépendrait notamment, d'une part de la virulence et de la transmissibilité interhumaine de l'agent viral, d'autre part, de la naïveté immunitaire des populations exposées au nouveau virus.

### Modes de transmission du virus grippal

L'analyse de la littérature scientifique suggère que la transmission du virus *Influenza* A est essentiellement liée à la notion de proximité entre un individu source et un individu exposé, qu'il s'agisse de contact direct ou indirect, de transmission par gouttelettes ou par aérosols.

La question posée dans la saisine concerne la transmission du virus à distance au sein d'un bâtiment, notamment via les systèmes de ventilation.

Afin d'évaluer ce risque, il convient d'analyser l'ensemble de la chaîne de transmission du virus. Considérant les éléments suivants :

- il a été démontré que les particules virales peuvent être émises lors de la toux, des éternuements ou de la simple respiration ;
- les gouttelettes émises sédimentent rapidement et les plus petites s'évaporent, formant ainsi des aérosols susceptibles d'être transportés à distance par les systèmes de ventilation ;
- les études de laboratoire montrent que les conditions de température et d'humidité régnant dans les bâtiments permettent la survie du virus de la grippe pendant plusieurs heures ;
- les études expérimentales animales montrent qu'il existe une transmission possible du virus de la grippe par des aérosols, bien que ces études n'aient pas permis d'évaluer la possibilité de transmission du virus au delà de 2,5 mètres ;
- deux études épidémiologiques humaines ne permettent pas d'exclure la possibilité de transmission à distance *via* des aérosols ;

et en l'absence de connaissance sur la virulence possible d'un futur virus *Influenza A* à risque pandémique, le groupe de travail estime que sa transmission à distance *via* des aérosols, ne peut être exclue.

### Description des systèmes d'aération et de ventilation dans les bâtiments

Le rapport décrit les principaux systèmes de ventilation utilisés dans les bâtiments, à savoir :

- la ventilation naturelle par ouvrants extérieurs, ou par conduits à tirage naturel, retrouvée dans la plupart des immeubles d'habitation ;
- la ventilation mécanique contrôlée simple flux, présente dans les habitats individuels et collectifs, ainsi que dans les bâtiments du secteur tertiaire ;
- la ventilation mécanique contrôlée double flux essentiellement présente dans les bâtiments du secteur tertiaire ;
- les systèmes avec centrale de traitement d'air (CTA) avec ou sans recyclage d'air, utilisée dans les bâtiments du secteur tertiaire, tels que les hypermarchés, les centres commerciaux et les immeubles de bureaux.

Tel qu'il ressort des observations de terrain, le fonctionnement constaté de ces dispositifs ne correspond pas toujours au fonctionnement théorique et le cheminement de l'air dans les bâtiments n'est pas toujours conforme aux prévisions.

### Évaluation du risque de transmission à distance du virus *Influenza* pandémique par les systèmes de ventilation.

Selon les données de la littérature, la ventilation naturelle ou mécanique jouerait un rôle ambivalent dans le transport des aérosols :

- un rôle bénéfique en diluant la quantité de particules virales dans la pièce, d'où une diminution du risque de transmission de proximité du virus grippal ;
- un rôle délétère potentiel, en favorisant le transport des particules virales par le réseau aéraulique, ce qui pourrait augmenter le risque de transmission à distance.

Dans le cas des systèmes de ventilation sans recyclage d'air, la propagation des particules virales est limitée aux lieux de circulation de l'air, vers les conduits d'évacuation. Par

conséquent, ces systèmes jouent un rôle bénéfique, puisqu'ils diminuent le risque de transmission de proximité, sans générer un risque de transmission à distance.

En revanche, dans le cas des systèmes de ventilation comportant un recyclage d'air, tels ceux équipant les hypermarchés ou certains immeubles de bureaux, bien que ces systèmes aient pour effet une diminution de la concentration des particules virales par dilution à proximité de l'individu source, ils favorisent le transport et la propagation de ces particules à l'ensemble du bâtiment. De ce fait, ces systèmes diminuent le risque de transmission de proximité, mode de transmission majoritaire de la grippe, mais entraînent un risque potentiel de transmission du virus à distance. Même si ce risque paraît extrêmement faible lors des épidémies de grippe saisonnière, il n'est pas à négliger, en cas d'apparition d'un nouveau virus potentiellement très virulent et agissant sur une population naïve sur le plan immunitaire.

### Efficacité des systèmes de traitement d'air

La concentration des aérosols viraux dans l'air peut être diminuée au moyen de systèmes de filtration ou d'ionisation. Les virus peuvent être inactivés grâce aux systèmes de photocatalyse, photolyse ou plasma froid. Ces procédés permettent de limiter l'exposition des individus aux aérosols viraux.

Si l'efficacité de certains de ces systèmes a été démontrée en laboratoire d'essai, le groupe de travail ne peut conclure quant à leur efficacité réelle dans les bâtiments.

### Capacité des laboratoires à procéder à des mesures de quantité de virus *Influenza* dans l'air

En pratique, même s'il est techniquement possible d'effectuer des prélèvements d'air ponctuels à l'aide de biocollecteurs, les laboratoires compétents dans ce domaine sont actuellement très peu nombreux. En ce qui concerne la surveillance en flux continu de l'aéro-biocontamination dans un but d'alerte en temps réel, celle-ci n'est pas possible actuellement. Cependant, des développements sont en cours, pour coupler prélèvements d'air et analyses biologiques en débit continu.

## **Conclusion de l'expertise collective**

Compte tenu de l'ensemble des résultats des études épidémiologiques et expérimentales, le groupe de travail estime que la transmission à distance du virus de la grippe pandémique, *via* des aérosols, ne peut être exclue.

L'analyse des risques réalisée dans ce rapport montre que les systèmes de ventilation avec recyclage d'air présentent plus de risques de transmission à distance du virus comparés aux systèmes de ventilation sans recyclage.

## Recommandations issues de l'expertise collective

### 1. En période pré-pandémique

#### Mesures relatives aux systèmes de ventilation

Il est important pour le gestionnaire de bâtiments (locaux de travail, logements, établissements recevant du public), d'observer les dispositions réglementaires en vigueur, notamment :

- d'avoir une connaissance précise des installations de ventilation et de distribution d'air dans leurs bâtiments ;
- de veiller à leur entretien régulier, de vérifier leurs performances et de remédier à tout dysfonctionnement ;
- de vérifier la qualité du renouvellement d'air dans les locaux (bilan des flux aérauliques).

La faisabilité d'une modification du fonctionnement de ces systèmes (suppression du recyclage d'air, avec si possible maintien des conditions de température et humidité) devrait être également évaluée par le gestionnaire.

#### Recommandations pour les occupants de tout type de bâtiment

Il serait souhaitable que le public soit informé des recommandations de bonnes pratiques de ventilation des bâtiments à usage d'habitation (par exemple, ne pas obturer les entrées d'air et les bouches d'extraction, etc.).

Dans les locaux à usage professionnel, l'employeur informera les salariés des mesures mises en œuvre, ainsi que des comportements individuels à adopter, en cas de pandémie.

### 2. En période pandémique

#### Mesures relatives aux systèmes de ventilation et conditions d'aération

Ces mesures doivent s'appliquer indépendamment de toutes considérations de confort thermique et d'économies d'énergie. Elles visent à favoriser la dilution des particules virales dans l'air ambiant, tout en limitant leur propagation. Ainsi, le groupe de travail recommande :

- d'assurer une aération régulière des locaux disposant d'ouvrants extérieurs, par leur ouverture, quel que soit le mode de ventilation existant, afin de diminuer le risque de transmission de proximité. On y associera, dans la mesure du possible la fermeture des portes ;
- d'arrêter le recyclage de l'air, si cela est techniquement possible, sauf impossibilité d'ouvrir les fenêtres et dans le cas de bureaux paysagés.
- de calfeutrer la porte palière dans les appartements, afin d'éviter les échanges d'air avec la cage d'escalier.

#### Mesures générales de protection sanitaire des personnes

Le groupe de travail rappelle l'intérêt primordial des mesures d'hygiène préconisées dans le plan national de prévention et de lutte « pandémie grippale » (hygiène respiratoire, port du masque chirurgical pour les sujets présentant des signes d'infection respiratoire, lavage régulier des mains, etc.)

## Besoins de connaissances identifiés

Au vu des manques actuels de connaissances, le groupe de travail recommande d'acquérir des données dans les domaines suivants :

- transmission à distance du virus Influenza, en situation expérimentale et sur site ;
- survie des virus Influenza dans l'environnement (air, surfaces, etc.) ;
- comportement physico-chimique des virus dans les aérosols ;
- caractérisation des émissions de particules virales par les individus infectés ;
- efficacité des épurateurs d'air intégrés au sein des bâtiments ;
- développement de méthodes permettant d'étudier les phénomènes aérauliques inhérents aux systèmes de ventilation et notamment les cheminements de l'air au sein des bâtiments ;
- recherche et développement de systèmes intégrés (biocollecteurs et analyses) de détection en continu de virus *Influenza* dans l'air ;
- développement d'outils de caractérisation rapide de souches virales émergentes, afin de mettre au point au plus tôt des réactifs spécifiques de détection et/ou diagnostic ;
- amélioration des connaissances sur les virus Influenza A à risque pandémique.

Les Comité d'Experts Spécialisés « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques » et « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » ont adopté à la majorité des voix, le rapport d'expertise collective, respectivement lors des séances du 5 janvier 2009 et du 20 janvier 2009. Ils font part de cette adoption à la direction générale de l'Afsset.

## **Positions divergentes**

Deux membres du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » se sont abstenus d'adopter le rapport. Selon ces experts, si la diffusion d'aérosols de virus *Influenza* « classique » est théoriquement possible dans les bâtiments, dans un même espace ou *via* des systèmes de ventilation ou de climatisation, il n'existe pas de preuves convaincantes d'une transmission interhumaine du virus par des aérosols sur de longues distances. Dans les conditions où un virus pandémique « humanisé » aurait un comportement similaire à celui du virus de la grippe saisonnière, les mesures préconisées par le groupe de travail sur les installations de ventilation/climatisation ne leur paraissent pas adéquates. Les mesures de prévention seront donc à adapter en fonction des connaissances acquises sur les caractéristiques d'une nouvelle souche du virus.

Cette position est développée dans une publication scientifique (Ezratty V, Squinazi F. Virus influenza pandémique à l'intérieur des bâtiments : quel risque de transmission par les systèmes de ventilation ou de climatisation ? *Environnement Risque & Santé*, 2008 ;7 : 255-263).

Deux membres du CES « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques », ont voté contre la validation du rapport et un expert s'est abstenu.

Selon ces experts, le risque de transmission à distance du virus de la grippe par les systèmes de ventilation ne peut-être exclu au regard des quelques études épidémiologiques et expérimentales disponibles. Cependant, celles-ci ne permettent pas de répondre à la question fondamentale de la transmission par aérosol de proximité *versus* transmission par aérosol à distance, en particulier suite à la reprise de l'aérosol par des systèmes de ventilation et/ou climatisation. Néanmoins, s'il existe, ce mode de transmission n'est pas le mode de transmission majoritaire et n'est pas suffisamment fréquent pour qu'il doive être pris en compte dans la mise en place de mesures préventives dans les bâtiments.

Ainsi, selon ces experts, les mesures préventives actuellement recommandées dans les établissements de santé sont basées sur le postulat selon lequel la transmission du virus *Influenza* se fait *via* des gouttelettes et des aérosols de courte portée, mais non *via* des aérosols de longue portée. Le fait de reconnaître que cette transmission puisse avoir lieu par aérosol de longue portée, conduirait les établissements de santé à mettre en œuvre des mesures préventives plus contraignantes qu'elles ne le sont actuellement et non justifiées. Ces experts estiment qu'en l'état actuel des connaissances, les seules recommandations possibles, sont d'améliorer les connaissances sur les virus *Influenza* A, en particulier leurs modes de transmission, leurs conditions de survie, ainsi que leur caractère infectieux, tant en milieu extérieur que dans un système de ventilation.

Maisons-Alfort,

**M. Christian ELICHEGARAY, président du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens », le 05 mai 2009**



**Mme Sylvie RAUZY, présidente du CES « Évaluation des risques liés aux eaux et agents biologiques », le 12 mai 2009**



---

**Évaluation du risque sanitaire pour l'homme lié à la présence de virus *Influenza* pandémique dans l'air des bâtiments et à sa propagation éventuelle par les dispositifs de ventilation**

---

Saisine n°2006/003

**RAPPORT**  
d'expertise collective

**Comités d'experts spécialisés**

**« Évaluation des risques liés aux milieux aériens »**

**et**

**« Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques »**

**Groupe de travail « Virus *Influenza* Pandémique - Ventilation »**

**Janvier 2009**

## Mots clés

---

air, virus influenza, épidémie, pandémie, ventilation, climatisation, aérosol, gouttelette, grippe bâtiment

**Rapport** : Janvier 2009 • version : finale

## Présentation des intervenants

### **PARTICIPATION AFSSET**

---

#### **Coordination scientifique**

Mme Nathalie DUCLOVEL-PAME - Chef de projets scientifiques, Unité « Eaux et agents biologiques »

Mme Paulina CERVANTES - Chef de l'unité « Eaux et agents biologiques » jusqu'au 17 juin 2008.

Mme Sylvie ZINI - Chef de l'unité « Eaux et agents biologiques » à partir du 18 juin 2008.

#### **Contribution scientifique**

Mme Nathalie DUCLOVEL-PAME - Docteur en Pharmacie - Chef de projets scientifiques, unité « Eaux et agents biologiques »

Mme Sylvie ZINI - Docteur en Pharmacie - Docteur en Sciences - Chef de l'unité « Eaux et agents biologiques » à partir du 18 juin 2008.

#### **Secrétariat administratif**

Mme Séverine BOIX

### **GROUPE DE TRAVAIL « VIRUS INFLUENZA PANDEMIQUE (VIP)-VENTILATION**

---

#### **Président :**

M. Pierre-André CABANES - Médecin en charge de l'évaluation des risques sanitaires au service des études médicales d'EDF

#### **Membres :**

M. Rafik ABSI - Enseignant-chercheur à l'École de biologie Industrielle de Cergy-Pontoise,- modélisation, mécanique des fluides

Mme Isabelle BALTU - Ingénieur agronome à l'INRS. Département Expertise et Conseil Technique

Mme Jeanne BRUGERE-PICOUX - Professeur. Pathologie médicale du bétail et des animaux de basse cour. École nationale vétérinaire d'Alfort

M. Jean-François GEHANNO - Médecin du travail. Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier au CHU de Rouen au Service Médecine du Travail et Pathologie Professionnelle. EA 4108

M. Jean-Pierre GUT - Professeur des universités- Praticien hospitalier. Laboratoire de Virologie des hôpitaux universitaires de Strasbourg. UMR-748. Université Louis Pasteur. Strasbourg

M. Yannick MOREL - Chef du département détection biologique au Centre d'études du Bouchet - toxicologie moléculaire

M. Jacques RIBERON- Docteur en mécanique des fluides. CSTB. Champs sur Marne.

M. Enric ROBINE - Docteur en Microbiologie - Responsable du pôle « Recherche et Innovation pour l'Hygiène des Bâtiments » du CSTB de Champs sur Marne.

Mme Renée RUNIGO-MAGIS - Ingénieur CNAM en sécurité du travail. Assistance Publique - Hôpitaux de Paris (APHP)-DPRS-DPST.

**ADOPTION DU RAPPORT PAR LE(S) COMITE(S) D'EXPERTS SPECIALISES**

---

Ce rapport a été soumis pour commentaires aux CES :

« *Évaluation des risques liés aux milieux aériens* »

**Président**

M. Christian ELICHEGARAY - Chef du Département Air de l'ADEME- physico-chimie de l'atmosphère

**Membres**

M. René ALARY - Ancien chef du département Air au LCPP- pollution et chimie atmosphérique

Mme Isabella ANNESI MAESANO – Directrice de recherche à l'INSERM - responsable de l'équipe d'épidémiologie des maladies allergiques et respiratoires - épidémiologie respiratoire, pollution atmosphérique

M. Olivier BLANCHARD - Ingénieur de recherche "qualité de l'air" à la direction des risques chroniques de l'INERIS - qualité de l'air

M. Pierre-André CABANES - Médecin en charge de l'évaluation des risques sanitaires au service des études médicales d'EDF

M. Dave CAMPAGNA - Responsable de la cellule d'épidémiologie à la RATP - épidémiologie santé-travail et de l'environnement

Mme Véronique DELMAS - Directrice d'Air Normand - pollution et chimie atmosphérique

Mme Véronique EZRATTY - Médecin en charge de l'évaluation des risques sanitaires au service des études médicales d'EDF

M. Robert GARNIER - Médecin au CAP de Paris - Maître de conférences à l'hôpital Fernand Widal - toxicologie

M. Philippe GLORENNEC - Enseignant chercheur à l'EHESP- épidémiologie, évaluation des risques sanitaires

Mme Séverine KIRCHNER - Responsable du secteur "qualité de l'air intérieur" au CSTB - chimie et pollution de l'atmosphère air intérieur

Mme Agnès LEFRANC - Coordinatrice du programme de surveillance air et santé à l'InVS - épidémiologie, statistique, pollution atmosphérique

M. Maurice MILLET - Maître de conférences à l'Université Louis Pasteur - physique-chimie, spécialiste des phytosanitaires dans l'air

M. Alain MORCHEOINE - Directeur du département de l'Air, du bruit et de l'efficacité énergétique à l'ADEME - qualité de l'air, émissions dans l'air

M. Yannick MOREL - Chef du département détection biologique au Centre d'études du Bouchet - toxicologie moléculaire

M. Jean-Paul MORIN - Chargé de recherche à l'INSERM - spécialiste des émissions moteur

M. Christophe PARIS - Médecin, professeur des universités et praticien hospitalier au CHU de Nancy - épidémiologie, pathologies professionnelles

M. Vincent-Henri PEUCH - Chercheur en modélisation numérique de la composition chimique de l'atmosphère à METEO France - modélisation atmosphérique.

M. Charles POINSOT - Directeur de d'Atmo Nord Pas de Calais - qualité de l'air, pollution de l'air

Mme Martine RAMEL - Responsable du programme LCQA à INERIS - qualité de l'air, polluants de l'air

M. Rémy SLAMA - Chargé de recherche à l'INSERM - épidémiologie environnementale appliquée à la fertilité et la reproduction humaines

M. Fabien SQUINAZI - Médecin biologiste, directeur du LHVP - air intérieur, pathologies professionnelles induites par la qualité de l'air, microbiologie

M. Jacques VENDEL - Chef de laboratoire à l'IRSN - aérosols, métrologie

**« Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques »****Président**

Mme Sylvie RAUZY - Ingénieur Chimiste, Docteur es Sciences en Hydrologie, Directeur de la prospective au CRECEP - Risques liés à l'eau, qualité des eaux.

**Membres**

M. Rafik ABSI - Docteur, Ingénieur, Enseignant-chercheur à l'École de biologie Industrielle. Cergy-Pontoise, - Modélisation, mécanique des fluides

M. Jean-Jacques BALLEZ - Médecin immunologiste, Professeur à l'Université et au CHU de Caen et au Laboratoire d'Immunologie et Immunopathologie – Immunopathologie, infections.

M. Jean-Marc BERJEAUD - Docteur, maître de conférences à l'Université de Poitiers et au Laboratoire de Microbiologie fondamentale et appliquée - Bactériologie, biofilms.

M. Jean-Luc BOUDENNE - Docteur HDR, Maître de conférence à l'Université de Provence, Chef de l'équipe chimie et métrologie des eaux au Laboratoire de Chimie Environnement - Métrologie des eaux, chimie et qualité des eaux.

Mme Jeanne BRUGERE-PICOUX - Professeur. Pathologie médicale du bétail et des animaux de basse cour. École nationale vétérinaire d'Alfort.

M. Pierre-Jean CABILLIC - Ingénieur ENGEES et Ingénieur du Génie Sanitaire. Chef du département «Santé Environnement» de la DDASS du Morbihan - Qualité des eaux, assainissement, baignades et process de traitement.

M. Patrick CAMUS - Cadre de Recherche, Chef de laboratoire à l'IFREMER - Écologie, hydrologie, pollution et surveillance des eaux marines.

M. Edmond CREPPY - Professeur à l'Université de Bordeaux 2, Directeur du Laboratoire de Toxicologie et d'Hygiène Appliquée -Modes d'action des toxiques de l'environnement.

M. Christophe CUDENNEC - Ingénieur agronome et Docteur en Hydrologie, Maître de Conférences à l'Agrocampus de Rennes - Hydrologie, ressources en eau, aménagement du territoire, modélisation.

M. Christophe DAGOT - Professeur, Responsable Eau et Environnement de l'Université de LIMOGES (ENSIL) - Génie des procédés, traitement des eaux.

M. Sam DUKAN - Docteur en Microbiologie, Responsable d'équipe au Laboratoire de Chimie Bactérienne au CNRS de Marseille - Chimie bactérienne, mécanismes de survie bactérienne.

M. Jean-François GEHANNO - Médecin du travail. Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier au CHU de Rouen au Service Médecine du Travail et Pathologie Professionnelle - Risques professionnels en particulier biologiques et toxiques.

M. Éric GILLI - Docteur en géologie, Professeur à l'Université Paris 8 au Département de géographie - Hydrogéologie, eaux karstiques.

M. Jean-Pierre GUT. Professeur des universités- Praticien hospitalier. Laboratoire de Virologie des hôpitaux universitaires de Strasbourg. UMR-748. Université Louis Pasteur. Strasbourg.

M. Didier HILAIRE - Docteur, expert en microbiologie, Expert décontamination à la DGA - Désinfection des agents du risque biologique et stabilité des agents biologiques dans l'environnement.

M. Jean-François HUMBERT - Docteur, Directeur de Recherche à l'INRA de Thonon-les-Bains - Écologie microbienne.

M. Abdel LAKEL - Ingénieur de recherche, Co-responsable du domaine Air/Eau-Pollution Santé, Pilote du département «Climatologie aérodynamique pollution épuration» au CSTB - Dépollution des eaux usées.

Mme Colette LE BACLE - Médecin du travail, Conseiller médical en Santé au Travail, Chef de projet «Risques Biologiques» à l'INRS - Risques biologiques professionnels.

M. Éric LEDRU - Médecin biologiste, Médecin coordinateur à l'ANAEM - Santé publique et médecine tropicale.

M. Patrick MARCHANDISE - Ingénieur des travaux publics d'État, Ingénieur du génie sanitaire, Ingénieur européen, Expertise, conseil et Inspection au Conseil Général des Ponts et Chaussées section Sciences et Techniques - Qualité, traitement des eaux, impacts.

Mme Laurence MATHIEU - Docteur es Sciences, Enseignant Chercheur, Maître de Conférence à la Faculté de médecine de Vandœuvre-lès-Nancy, École Pratique des Hautes Études dans le département Environnement et Santé - Exposition aux contaminants biologiques.

M. Gérard MOGUEDET - Professeur, Hydrogéologue agréée en matière d'hygiène publique, Vice Président de l'Université d'Angers - Hydrologie, hydrogéologie et pollution des eaux.

Mme Anne MORIN - Docteur d'université, Coordinatrice du programme «Qualité des Eaux» à l'INERIS - Analyses chimiques, physico-chimiques des eaux, métrologie.

Mme Catherine MOUNEYRAC - Professeur en écotoxicologie aquatique, Directrice de l'Institut de Biologie et d'Écologie Appliquée à l'Université Catholique de l'Ouest - Ecotoxicologie, biomarqueurs.

Mme Alessandra OCCHIALINI-CANTET - Maître de conférence, Docteur es Sciences, Enseignant chercheur au CNRS dans l'équipe «Microbiologie des Infections bactériennes chroniques et stratégies anti-infectieuses» - Microbiologie, pathogénie des agents infectieux.

Mme Anne-Marie POURCHER - Maître de conférences, enseignant - Chercheur au CEMAGREF de Rennes dans l'Unité «Gestion Environnementale et Traitement biologique des déchets» - Aspect sanitaire des traitements biologiques des déchets liquides et solides, survie bactérienne.

Mme Renée RUNIGO-MAGIS - Ingénieur CNAM en Sécurité au Travail, Ingénieur Sécurité à l'APHP - Hygiène et sécurité professionnelle.

Mme Marie-Pierre SAUVANT-ROCHAT - Professeur de santé publique, Chef de service à l'Université d'Auvergne au Laboratoire Santé publique et Environnement - Santé publique et épidémiologie.

Mme Nicole TANDEAU DE MARSAC - Docteur es Science, Responsable d'unité de recherche à l'Institut Pasteur de Paris - Microbiologie, cyanobactéries.

Mme Michèle TREMBLAY - Médecin en santé communautaire, Médecin conseil en maladies infectieuses et en santé au travail à l'INSPQ à la Direction de la santé publique de Montréal - Risques biologiques professionnels liés aux eaux.

M. Bernard TRIBOLLET - Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité, Docteur d'État, Directeur de Recherches à l'Université de Jussieu au Laboratoire Interfaces et Systèmes Electrochimiques - Biofilms, entartrage, corrosion des matériaux en milieux naturels.

Mme Isabelle VILLENA - Médecin biologiste, Professeur des Universités - Praticien Hospitalier au CHU de Reims au Laboratoire de Parasitologie et Mycologie - Parasitologie et mycologie, diagnostic et traitement de zoonoses.

Après prise en compte des commentaires, le rapport a été approuvé par les membres du groupe de travail.

Il a été adopté par le CES « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques », le 5 janvier 2009 et par le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » le 20 janvier 2009.

### **Audition de personnalités extérieures**

M. Jean-Pierre ANGERMANN - directeur technique et des exploitations adjoint

DALKIA - Direction technique et des exploitations

Mme Isabelle BONMARIN - épidémiologiste

InVS – Département des maladies infectieuses

M. Fabrice CARRAT -épidémiologiste

INSERM UMR-S 707- Épidémiologie, système d'information, modélisation

M. Christian FELDMANN - directeur technique

Centre d'études et de formation pour le génie climatique et l'équipement technique du bâtiment  
(COSTIC)

## SOMMAIRE

<b>Présentation des intervenants</b> .....	<b>3</b>
<b>Expertise collective : synthèse et conclusions</b> .....	<b>11</b>
<b>Abréviations</b> .....	<b>18</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>21</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>21</b>
<b>Glossaire</b> .....	<b>22</b>
1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine .....	24
<b>1.1 Contexte</b> .....	<b>24</b>
<b>1.2 Objet de la saisine</b> .....	<b>24</b>
<b>1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation</b> .....	<b>24</b>
2 Généralités sur les virus <i>Influenza</i> ; émergence d'un virus pandémique .....	26
3 Modes de transmission .....	28
<b>3.1 Caractérisation des émissions de particules par la sphère oro-nasale chez l'homme</b> .....	<b>28</b>
3.1.1 Caractéristiques des particules émises par les voies respiratoires : concentration et granulométrie .....	29
3.1.2 Comportement des gouttelettes et des aérosols après émission .....	29
3.1.3 Caractéristiques des particules contenant des micro-organismes .....	30
<b>3.2 Viabilité des virus à l'intérieur des aérosols et en fonction des conditions environnementales</b> .....	<b>31</b>
3.2.1 Influence de l'humidité et de la température .....	32
3.2.2 Influence des surfaces solides .....	32
3.2.3 Influence des rayonnements ultra-violetts .....	32
<b>3.3 Données humaines relatives à la transmission des virus <i>Influenza A</i></b> .....	<b>33</b>
3.3.1 Données épidémiologiques .....	33
3.3.2 Données expérimentales .....	35
<b>3.4 Données humaines relatives à la transmission d'autres virus respiratoires</b> .....	<b>35</b>
3.4.1 Données épidémiologiques .....	35
3.4.1.1 Virus du SRAS .....	35
3.4.1.2 Virus de la rougeole et de la varicelle .....	36
3.4.2 Données expérimentales .....	36
3.4.3 Discussion .....	36
<b>3.5 Données animales relatives à la transmission des virus <i>Influenza A</i></b> .....	<b>37</b>
3.5.1 Virus <i>Influenza A</i> hautement pathogène chez les volailles .....	37
3.5.2 Virus <i>Influenza A</i> chez d'autres espèces animales .....	37
<b>3.6 Conclusions sur les modes de transmission des virus <i>Influenza A</i></b> .....	<b>39</b>

4	Description des systèmes d'aération et de ventilation dans les bâtiments .....	40
<b>4.1</b>	<b>Principes de ventilation .....</b>	<b>40</b>
4.1.1	Ventilation par pièces séparées.....	40
4.1.2	Ventilation générale par balayage .....	40
4.1.3	Ventilation par balayage partiel .....	42
<b>4.2</b>	<b>Typologies des principaux systèmes de ventilation.....</b>	<b>42</b>
4.2.1	Ventilation naturelle .....	42
4.2.1.1	Aération par ouvrants extérieurs.....	42
4.2.1.2	Ventilation par conduits à tirage naturel.....	42
4.2.2	Ventilation mécanique contrôlée.....	43
4.2.2.1	Ventilation mécanique contrôlée simple flux.....	43
4.2.2.2	Ventilation mécanique contrôlée double flux .....	44
4.2.3	Centrale de traitement d'air avec recyclage d'air .....	45
4.2.3.1	Unités de toiture (roof-top).....	46
4.2.4	Centrale de traitement de l'air sans recyclage .....	47
<b>4.3</b>	<b>État des lieux .....</b>	<b>47</b>
5	Évaluation du risque de transmission à distance du virus <i>Influenza</i> pandémique.....	48
<b>5.1</b>	<b>Modes de transmission des virus <i>Influenza A</i>.....</b>	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>Transport des particules virales à l'intérieur d'un bâtiment <i>via</i> les systèmes de ventilation .....</b>	<b>48</b>
5.2.1	Ventilation naturelle ou mécanique .....	48
5.2.2	Centrale de traitement de l'air.....	49
<b>5.3</b>	<b>Évaluation du risque de transmission du virus <i>Influenza</i> pandémique par les systèmes de ventilation .....</b>	<b>50</b>
5.3.1	Hypermarchés.....	50
5.3.2	Les immeubles de bureaux.....	51
5.3.2.1	Absence de ventilation mécanique .....	51
5.3.2.2	Ventilation mécanique contrôlée simple flux.....	51
5.3.2.3	Ventilation mécanique contrôlée double flux .....	51
5.3.2.4	Système de traitement d'air avec recyclage .....	52
5.3.3	L'habitat collectif .....	52
6	Recommandations du groupe de travail .....	53
<b>6.1</b>	<b>Dans le cadre de la préparation à une pandémie grippale .....</b>	<b>53</b>
6.1.1	Mesures relatives aux systèmes de ventilation .....	53
6.1.2	Recommandations pour les occupants de tout type de bâtiment.....	53
<b>6.2</b>	<b>En période pandémique.....</b>	<b>53</b>
6.2.1	Mesures relatives aux systèmes de ventilation et conditions d'aération.....	54
6.2.2	Mesures générales de protection sanitaire des personnes.....	55
7	Capacités des laboratoires à procéder à des mesures de quantités de virus <i>Influenza</i> dans l'air.....	56
<b>7.1</b>	<b>Aspects technologiques.....</b>	<b>56</b>
7.1.1	Prélèvement d'échantillons d'air .....	56

7.1.2	Analyses biotechnologiques .....	57
7.1.3	Surveillance de l'air : intérêts et limites .....	57
8	Efficacité des systèmes autonomes de traitement d'air.....	59
<b>8.1</b>	<b>Principes .....</b>	<b>59</b>
<b>8.2</b>	<b>Pertinence des systèmes appliqués à la maîtrise de l'aérocontamination virale .....</b>	<b>60</b>
8.2.1	Principaux dispositifs commercialisés .....	60
8.2.2	Performances épuratoires intrinsèques.....	61
8.2.3	Application des épurateurs en situation réaliste .....	61
8.2.3.1	Impact de la ventilation .....	61
8.2.3.2	Épuration en situation réaliste .....	61
<b>8.3</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>62</b>
9	Besoins de connaissances identifiés par le groupe de travail.....	63
10	Conclusions.....	64
11	Bibliographie .....	65
<b>11.1</b>	<b>Publications .....</b>	<b>65</b>
<b>11.2</b>	<b>Normes .....</b>	<b>71</b>
<b>11.3</b>	<b>Législation et réglementation.....</b>	<b>71</b>
ANNEXES .....		72
<b>Annexe 1 : Lettre de saisine .....</b>		<b>73</b>
<b>Annexe 2 : Dispositions réglementaires relatives à l'aération et la ventilation dans les bâtiments.....</b>		<b>74</b>
<b>Annexe 3 : Descriptifs des systèmes de traitement d'air.....</b>		<b>81</b>
<b>Annexe 4 : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine.....</b>		<b>91</b>

## Expertise collective : synthèse et conclusions



### EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

**Relatives à la saisine « Évaluation du risque sanitaire pour l'homme lié à la présence de virus *Influenza* pandémique dans l'air des bâtiments et sa diffusion éventuelle par les dispositifs de ventilation**  
Saisine Afsset n° « 2006/003 »

Ce document synthétise les travaux du groupe de travail « Virus *Influenza* pandémique - ventilation » et présente les éventuels compléments des Comité d'Experts Spécialisés « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » et « Évaluation des risques liés aux eaux et agents biologiques ».

#### Présentation de la question posée

L'Afsset a été saisie le 5 avril 2006 par le Délégué interministériel à la lutte contre la grippe aviaire (DILGA), d'une demande d'évaluation des risques sanitaires liés à la présence de virus *Influenza* pandémique dans l'air des bâtiments, en tenant compte des différentes technologies et de leurs spécificités techniques, telles que le recyclage, le traitement ou la climatisation de l'air. A l'issue de ce travail, il est demandé à l'agence d'émettre des recommandations afin d'éviter la diffusion de ces virus dans les bâtiments en fonction des situations distinguées dans le plan gouvernemental. Il est également demandé d'identifier les besoins de recherche.

Outre cette évaluation des risques, le DILGA a sollicité l'Agence afin d'apprécier d'une part, les capacités potentielles des laboratoires à procéder à des mesures de quantités de virus *Influenza* dans l'air, d'autre part, la pertinence de recourir à des dispositifs mobiles, ou non, de traitement d'air dans les locaux, susceptibles d'abaisser l'exposition des populations.

#### Contexte scientifique

Devant la menace de la survenue d'une pandémie grippale, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a élaboré en 1999 les grandes lignes d'un plan de préparation à une pandémie de grippe. Elle a demandé à chaque État membre de s'en inspirer pour la rédaction d'un plan national, adapté au système de santé en place et aux réalités locales. Ce plan a été révisé en 2005, pour prendre en compte la transmission à l'homme du virus grippal d'origine aviaire de sous-type H5N1, faisant craindre l'émergence d'un nouveau virus capable de déclencher une pandémie.

Le gouvernement français a arrêté en octobre 2004 un plan de prévention et de lutte contre une pandémie grippale qui a été actualisé en 2006, 2007, puis 2009, en fonction des avancées scientifiques et techniques, ainsi que des enseignements tirés des exercices nationaux. Ce plan, placé sous la responsabilité du DILGA a pour objectif de protéger la population en métropole et en outre-mer, ainsi que les ressortissants français à l'étranger, contre une menace de pandémie grippale. Il vise également à préserver la continuité de la vie sociale et économique pendant la phase pandémique.

1 / 7

## Organisation de l'expertise

L'Afsset a confié aux Comités d'Experts Spécialisés (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » et « Évaluation des risques liés aux eaux et agents biologiques » l'instruction de cette saisine. Ces derniers ont mandaté le groupe de travail « Virus *Influenza* pandémique- ventilation » (VIP-ventilation) pour la réalisation des travaux d'expertise.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement aux CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres des CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

## Description de la méthode

Considérant que les caractéristiques structurales et pathogéniques d'un nouveau virus *Influenza* pandémique ne sont pas connues au moment de la rédaction de ce rapport et qu'elles resteront inconnues jusqu'à l'émergence de ce virus, le groupe de travail a basé son expertise sur la propagation et la virulence des virus *Influenza* actuellement connus, ainsi que sur des hypothèses relatives à un futur virus dont le potentiel de virulence pourrait être élevé.

En outre, compte tenu des nombreuses typologies d'établissement recevant du public, les experts ont basé leur analyse sur quelques exemples : les hypermarchés, les immeubles de bureaux et les logements collectifs.

Le groupe de travail a effectué une revue des articles scientifiques et techniques, complétée par des auditions d'experts dans les domaines de l'épidémiologie et des systèmes de ventilation, afin de répondre à la question posée.

## Résultats de l'expertise collective

### Généralités sur les virus *Influenza* A - Émergence d'un virus pandémique

Les virus *Influenza* A peuvent être responsables de pandémie de grippe, comme cela fut le cas en 1918, 1957 et 1968. Les mécanismes impliqués dans le déclenchement d'une pandémie grippale ne sont pas complètement connus. La survenue de cet événement dépendrait notamment, d'une part de la virulence et de la transmissibilité interhumaine de l'agent viral, d'autre part, de la naïveté immunitaire des populations exposées au nouveau virus.

### Modes de transmission du virus grippal

L'analyse de la littérature scientifique suggère que la transmission du virus *Influenza* A est essentiellement liée à la notion de proximité entre un individu source et un individu exposé, qu'il s'agisse de contact direct ou indirect, de transmission par gouttelettes ou par aérosols.

La question posée dans la saisine concerne la transmission du virus à distance au sein d'un bâtiment, notamment via les systèmes de ventilation.

Afin d'évaluer ce risque, il convient d'analyser l'ensemble de la chaîne de transmission du virus. Considérant les éléments suivants :

- il a été démontré que les particules virales peuvent être émises lors de la toux, des éternuements ou de la simple respiration ;
- les gouttelettes émises sédimentent rapidement et les plus petites s'évaporent, formant ainsi des aérosols susceptibles d'être transportés à distance par les systèmes de ventilation ;
- les études de laboratoire montrent que les conditions de température et d'humidité régnant dans les bâtiments permettent la survie du virus de la grippe pendant plusieurs heures ;
- les études expérimentales animales montrent qu'il existe une transmission possible du virus de la grippe par des aérosols, bien que ces études n'aient pas permis d'évaluer la possibilité de transmission du virus au delà de 2,5 mètres ;
- deux études épidémiologiques humaines ne permettent pas d'exclure la possibilité de transmission à distance *via* des aérosols ;

et en l'absence de connaissance sur la virulence possible d'un futur virus *Influenza A* à risque pandémique, le groupe de travail estime que sa transmission à distance *via* des aérosols, ne peut être exclue.

#### Description des systèmes d'aération et de ventilation dans les bâtiments

Le rapport décrit les principaux systèmes de ventilation utilisés dans les bâtiments, à savoir :

- la ventilation naturelle par ouvrants extérieurs, ou par conduits à tirage naturel, retrouvée dans la plupart des immeubles d'habitation ;
- la ventilation mécanique contrôlée simple flux, présente dans les habitats individuels et collectifs, ainsi que dans les bâtiments du secteur tertiaire ;
- la ventilation mécanique contrôlée double flux essentiellement présente dans les bâtiments du secteur tertiaire ;
- les systèmes avec centrale de traitement d'air (CTA) avec ou sans recyclage d'air, utilisée dans les bâtiments du secteur tertiaire, tels que les hypermarchés, les centres commerciaux et les immeubles de bureaux.

Tel qu'il ressort des observations de terrain, le fonctionnement constaté de ces dispositifs ne correspond pas toujours au fonctionnement théorique et le cheminement de l'air dans les bâtiments n'est pas toujours conforme aux prévisions.

#### Évaluation du risque de transmission à distance du virus *Influenza* pandémique par les systèmes de ventilation.

Selon les données de la littérature, la ventilation naturelle ou mécanique jouerait un rôle ambivalent dans le transport des aérosols :

- un rôle bénéfique en diluant la quantité de particules virales dans la pièce, d'où une diminution du risque de transmission de proximité du virus grippal ;
- un rôle délétère potentiel, en favorisant le transport des particules virales par le réseau aéraulique, ce qui pourrait augmenter le risque de transmission à distance.

Dans le cas des systèmes de ventilation sans recyclage d'air, la propagation des particules virales est limitée aux lieux de circulation de l'air, vers les conduits d'évacuation. Par

conséquent, ces systèmes jouent un rôle bénéfique, puisqu'ils diminuent le risque de transmission de proximité, sans générer un risque de transmission à distance.

En revanche, dans le cas des systèmes de ventilation comportant un recyclage d'air, tels ceux équipant les hypermarchés ou certains immeubles de bureaux, bien que ces systèmes aient pour effet une diminution de la concentration des particules virales par dilution à proximité de l'individu source, ils favorisent le transport et la propagation de ces particules à l'ensemble du bâtiment. De ce fait, ces systèmes diminuent le risque de transmission de proximité, mode de transmission majoritaire de la grippe, mais entraînent un risque potentiel de transmission du virus à distance. Même si ce risque paraît extrêmement faible lors des épidémies de grippe saisonnière, il n'est pas à négliger, en cas d'apparition d'un nouveau virus potentiellement très virulent et agissant sur une population naïve sur le plan immunitaire.

#### Efficacité des systèmes de traitement d'air

La concentration des aérosols viraux dans l'air peut être diminuée au moyen de systèmes de filtration ou d'ionisation. Les virus peuvent être inactivés grâce aux systèmes de photocatalyse, photolyse ou plasma froid. Ces procédés permettent de limiter l'exposition des individus aux aérosols viraux.

Si l'efficacité de certains de ces systèmes a été démontrée en laboratoire d'essai, le groupe de travail ne peut conclure quant à leur efficacité réelle dans les bâtiments.

#### Capacité des laboratoires à procéder à des mesures de quantité de virus *Influenza* dans l'air

En pratique, même s'il est techniquement possible d'effectuer des prélèvements d'air ponctuels à l'aide de biocollecteurs, les laboratoires compétents dans ce domaine sont actuellement très peu nombreux. En ce qui concerne la surveillance en flux continu de l'aéro-biocontamination dans un but d'alerte en temps réel, celle-ci n'est pas possible actuellement. Cependant, des développements sont en cours, pour coupler prélèvements d'air et analyses biologiques en débit continu.

### **Conclusion de l'expertise collective**

Compte tenu de l'ensemble des résultats des études épidémiologiques et expérimentales, le groupe de travail estime que la transmission à distance du virus de la grippe pandémique, *via* des aérosols, ne peut être exclue.

L'analyse des risques réalisée dans ce rapport montre que les systèmes de ventilation avec recyclage d'air présentent plus de risques de transmission à distance du virus comparés aux systèmes de ventilation sans recyclage.

## Recommandations issues de l'expertise collective

### 1. En période pré-pandémique

#### Mesures relatives aux systèmes de ventilation

Il est important pour le gestionnaire de bâtiments (locaux de travail, logements, établissements recevant du public), d'observer les dispositions réglementaires en vigueur, notamment :

- d'avoir une connaissance précise des installations de ventilation et de distribution d'air dans leurs bâtiments ;
- de veiller à leur entretien régulier, de vérifier leurs performances et de remédier à tout dysfonctionnement ;
- de vérifier la qualité du renouvellement d'air dans les locaux (bilan des flux aérauliques).

La faisabilité d'une modification du fonctionnement de ces systèmes (suppression du recyclage d'air, avec si possible maintien des conditions de température et humidité) devrait être également évaluée par le gestionnaire.

#### Recommandations pour les occupants de tout type de bâtiment

Il serait souhaitable que le public soit informé des recommandations de bonnes pratiques de ventilation des bâtiments à usage d'habitation (par exemple, ne pas obturer les entrées d'air et les bouches d'extraction, etc.).

Dans les locaux à usage professionnel, l'employeur informera les salariés des mesures mises en œuvre, ainsi que des comportements individuels à adopter, en cas de pandémie.

### 2. En période pandémique

#### Mesures relatives aux systèmes de ventilation et conditions d'aération

Ces mesures doivent s'appliquer indépendamment de toutes considérations de confort thermique et d'économies d'énergie. Elles visent à favoriser la dilution des particules virales dans l'air ambiant, tout en limitant leur propagation. Ainsi, le groupe de travail recommande :

- d'assurer une aération régulière des locaux disposant d'ouvrants extérieurs, par leur ouverture, quel que soit le mode de ventilation existant, afin de diminuer le risque de transmission de proximité. On y associera, dans la mesure du possible la fermeture des portes ;
- d'arrêter le recyclage de l'air, si cela est techniquement possible, sauf impossibilité d'ouvrir les fenêtres et dans le cas de bureaux paysagés.
- de calfeutrer la porte palière dans les appartements, afin d'éviter les échanges d'air avec la cage d'escalier.

#### Mesures générales de protection sanitaire des personnes

Le groupe de travail rappelle l'intérêt primordial des mesures d'hygiène préconisées dans le plan national de prévention et de lutte « pandémie grippale » (hygiène respiratoire, port du masque chirurgical pour les sujets présentant des signes d'infection respiratoire, lavage régulier des mains, etc.)

### Besoins de connaissances identifiés

Au vu des manques actuels de connaissances, le groupe de travail recommande d'acquérir des données dans les domaines suivants :

- transmission à distance du virus Influenza, en situation expérimentale et sur site ;
- survie des virus Influenza dans l'environnement (air, surfaces, etc.) ;
- comportement physico-chimique des virus dans les aérosols ;
- caractérisation des émissions de particules virales par les individus infectés ;
- efficacité des épurateurs d'air intégrés au sein des bâtiments ;
- développement de méthodes permettant d'étudier les phénomènes aérauliques inhérents aux systèmes de ventilation et notamment les cheminements de l'air au sein des bâtiments ;
- recherche et développement de systèmes intégrés (biocollecteurs et analyses) de détection en continu de virus *Influenza* dans l'air ;
- développement d'outils de caractérisation rapide de souches virales émergentes, afin de mettre au point au plus tôt des réactifs spécifiques de détection et/ou diagnostic ;
- amélioration des connaissances sur les virus Influenza A à risque pandémique.

Les Comité d'Experts Spécialisés « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques » et « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » ont adopté à la majorité des voix, le rapport d'expertise collective, respectivement lors des séances du 5 janvier 2009 et du 20 janvier 2009. Ils font part de cette adoption à la direction générale de l'Afsset.

### Positions divergentes

Deux membres du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » se sont abstenus d'adopter le rapport. Selon ces experts, si la diffusion d'aérosols de virus *Influenza* « classique » est théoriquement possible dans les bâtiments, dans un même espace ou *via* des systèmes de ventilation ou de climatisation, il n'existe pas de preuves convaincantes d'une transmission interhumaine du virus par des aérosols sur de longues distances. Dans les conditions où un virus pandémique « humanisé » aurait un comportement similaire à celui du virus de la grippe saisonnière, les mesures préconisées par le groupe de travail sur les installations de ventilation/climatisation ne leur paraissent pas adéquates. Les mesures de prévention seront donc à adapter en fonction des connaissances acquises sur les caractéristiques d'une nouvelle souche du virus.

Cette position est développée dans une publication scientifique (Ezratty V, Squinazi F. Virus influenza pandémique à l'intérieur des bâtiments : quel risque de transmission par les systèmes de ventilation ou de climatisation ? *Environnement Risque & Santé*, 2008 ;7 : 255-263).

Deux membres du CES « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques », ont voté contre la validation du rapport et un expert s'est abstenu.

Selon ces experts, le risque de transmission à distance du virus de la grippe par les systèmes de ventilation ne peut-être exclu au regard des quelques études épidémiologiques et expérimentales disponibles. Cependant, celles-ci ne permettent pas de répondre à la question fondamentale de la transmission par aérosol de proximité *versus* transmission par aérosol à distance, en particulier suite à la reprise de l'aérosol par des systèmes de ventilation et/ou climatisation. Néanmoins, s'il existe, ce mode de transmission n'est pas le mode de transmission majoritaire et n'est pas suffisamment fréquent pour qu'il doive être pris en compte dans la mise en place de mesures préventives dans les bâtiments.

Ainsi, selon ces experts, les mesures préventives actuellement recommandées dans les établissements de santé sont basées sur le postulat selon lequel la transmission du virus *Influenza* se fait *via* des gouttelettes et des aérosols de courte portée, mais non *via* des aérosols de longue portée. Le fait de reconnaître que cette transmission puisse avoir lieu par aérosol de longue portée, conduirait les établissements de santé à mettre en œuvre des mesures préventives plus contraignantes qu'elles ne le sont actuellement et non justifiées. Ces experts estiment qu'en l'état actuel des connaissances, les seules recommandations possibles, sont d'améliorer les connaissances sur les virus *Influenza A*, en particulier leurs modes de transmission, leurs conditions de survie, ainsi que leur caractère infectieux, tant en milieu extérieur que dans un système de ventilation.

Maisons-Alfort,

**M. Christian ELICHEGARAY, président du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens », le 05 mai 2009**



**Mme Sylvie RAUZY, présidente du CES « Évaluation des risques liés aux eaux et agents biologiques », le 12 mai 2009**



## Abréviations

ADEME	agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ADN	acide désoxyribonucléique
AFSSA	agence française de sécurité sanitaire des aliments
AFSSET	agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail
Am	arrestance moyenne
ANAEM	agence nationale d'accueil des étrangers et des migrations
AP-HP	assistance publique- hôpitaux de Paris
ARN	acide ribonucléique
ASα 2, 3Gal	acides sialiques liés au galactose en α 2,3
ASα2, 6Gal	acides sialiques liés au galactose en α 2,6
CADR	clean air delivery rate
CAP	centre anti poison
CEMAGREF	institut de recherche finalisée de référence pour la gestion durable des eaux et des territoires
CES	comité d'experts spécialisés
CHU	centre hospitalo-universitaire
CNAM	conservatoire national des arts et métiers
COSTIC	centre d'études et de formation pour le génie climatique et l'équipement technique du bâtiment
CRECEP	centre de recherche, d'expertise et de contrôle des eaux de Paris
CRF	facteur de réduction de la concentration particulaire
CSTB	centre scientifique et technique du bâtiment
CTA	centrale de traitement de l'air
DDASS	direction départementale des affaires sanitaires et sociales
DEHS	di-ethyl-hexyl-sebacate
DBD	décharge à barrière diélectrique
DGA	délégation générale pour l'armement
DGS	direction générale de la santé
DI	dose infectieuse
DILGA	délégué interministériel à la lutte contre la grippe aviaire
DPRS	direction du personnel et des relations sociales

DPST	département prévention et santé au travail
ECR	effective cleaning rate
EDF	électricité de France
Em	efficacité moyenne
ENGEES	école nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg
ERP	établissement recevant du public
FFB	fédération française du bâtiment
GT	groupe de travail
HEPA	high efficiency particulate air
HR	humidité relative
IFREMER	institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
INERIS	institut national de l'environnement industriel et des risques
INRA	institut de recherche agronomique
INRS	institut national de recherche et de sécurité
INSERM	institut national de la santé et de la recherche médicale
INSPQ	institut national de santé publique du Québec
InVS	institut de veille sanitaire
IRSN	institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
LCPP	laboratoire central de la préfecture de police
LHVP	laboratoire d'hygiène de la ville de Paris
MPPS	most penetrating particule size
OMS	organisation mondiale de la santé
OQAI	observatoire de la qualité de l'air intérieur
PCR	polymerase chain reaction
PSAS	programme de surveillance air et santé
RATP	régie autonome des transports parisiens
SGDN	secrétariat général de la défense nationale
SRAS	syndrome respiratoire aigu sévère
TCID 50	50 % tissue culture infectious dose
THE	très haute efficacité
ULPA	ultra low penetrating air
UMR	unité mixte de recherche
UV	ultra-violets

UV-C	ultra-violets de type C
VIA	virus <i>Influenza A</i>
VIAFP	virus <i>Influenza</i> aviaire faiblement pathogène
VIAHP	virus <i>Influenza</i> aviaire hautement pathogène
VIAHP(H5N1)	virus <i>Influenza</i> aviaire hautement pathogène de sous-type H5N1
VIP	virus <i>Influenza</i> pandémique
VMC	ventilation mécanique contrôlée
VRS	virus respiratoire syncytial
VZV	virus de la varicelle et du zona

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Débit minimal d'air neuf par occupant à respecter, dans les locaux à pollution non spécifique _____	74
Tableau 2 : Débits d'extraction d'air dans les pièces de services en m <sup>3</sup> par heure _____	76
Tableau 3 : Débits d'extraction d'air à respecter en fonction du débit total minimal et du débit réduit minimal en cuisine _____	76
Tableau 4 : Typologie des établissements recevant du public _____	77
Tableau 5 : Débit minimal d'air neuf à respecter dans les locaux à pollution non spécifique, d'après la circulaire du 20 janvier 1983 relative à la révision du règlement sanitaire départemental type _____	79
Tableau 6 : Classification des filtres de moyenne et haute efficacité selon la norme NF EN 779, (2003) _____	82
Tableau 7 : Classification des filtres de très haute efficacité _____	83
Tableau 8 : Concentration en ozone, en monoxyde et en dioxyde d'azote au sortir d'un générateur d'ions négatifs en fonction de différents voltages appliqués durant 1 heure, (Wu et Lee, 2004) _____	85
Tableau 9 : Concentrations de peroxyde d'hydrogène obtenues pour différentes tensions électriques et humidités relatives avec un ioniseur à effet couronne, d'après Richardson et al., 2003 _____	85
Tableau 10 : Effective Cleaning Rate obtenu pour divers matériaux, lors d'un traitement par ionisation, pour un aérosol monodispersé de NaCl de 30 et 300 nm _____	86
Tableau 11 : Constantes de sensibilité aux radiations ultraviolettes UV-C _____	89

## Liste des figures

Figure 1 : Principe de la ventilation générale par balayage _____	41
Figure 2 : Conduits à tirage naturels _____	43
Figure 3 : Principe de la ventilation mécanique contrôlée simple flux _____	44
Figure 4 : Principe d'une ventilation double flux avec échangeur récupérateur de chaleur _____	45
Figure 5 : Principe d'une CTA avec recyclage d'air _____	46
Figure 6 : Principe d'une CTA sans recyclage _____	47
Figure 7 : Représentation des mécanismes de capture sur une fibre collectrice _____	81
Figure 8 : Allure des efficacités unitaire fractionnelles d'un média fibreux en fonction de la taille des particules _____	81
Figure 9 : Schéma de principe d'un générateur d'ions par décharges à barrière diélectrique, Laboratoire de physique des gaz et des plasmas, 2007 _____	84
Figure 10 : Courbes expérimentales et théoriques présentant la réduction de la concentration particulaire ( $CRF = C_0/C_\infty$ , avec $C_0$ et $C_\infty$ , respectivement la concentration initiale et finale en condition stationnaire) en fonction de la taille des particules _____	87
Figure 11 : Variation du facteur de réduction de la concentration (CRF), dans des conditions stationnaires à la source, en fonction de la taille des particules ( $\mu\text{m}$ ), les conditions de ventilation (à gauche : non ventilé et à droite : renouvellement d'air de 0,5 h <sup>-1</sup> ) et la concentration en ions (de 0 à 106 ions.cm <sup>-3</sup> ), d'après Mayya et al., 2004 _____	87
Figure 12 : Représentation schématique du processus de photo-excitation du dioxyde de titane (TiO <sub>2</sub> ) par un rayonnement UV (R=Réduction et O=Oxydation) _____	90

## Glossaire

**Aérosol** : Suspension dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides, ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable (par convention  $v \leq 25 \text{ cm.s}^{-1}$ ). Les aérosols de diamètre aérodynamique moyen supérieur à 10  $\mu\text{m}$  sont en général retenus au niveau du nez et des voies aériennes supérieures.

Les particules de diamètre compris entre 2 et 10  $\mu\text{m}$  se déposent également au niveau de l'arbre trachéobronchique et les particules les plus petites, au niveau des voies aériennes terminales et des alvéoles.

**Droplet nuclei** : Particules formées par l'évaporation de gouttelettes.

**Épidémie** : Propagation rapide d'une maladie infectieuse, touchant simultanément un grand nombre de personnes. Elle peut se propager d'une région à une autre, contrairement à une endémie qui est la présence habituelle d'une maladie dans une zone géographique.

**Fomites** : Objets inertes potentiellement capables d'adsorber, retenir, transporter des micro-organismes infectieux.

**Gouttelettes** : Désignent un petit volume de liquide qui est expulsé à l'occasion par exemple d'une toux, d'un éternuement. Les plus grosses sédimentent rapidement et n'ont pas la capacité d'atteindre le tractus respiratoire profond. Les autres s'évaporent pour former des *droplet nuclei*.

**Individu source** : Individu infecté ou colonisé à l'origine de la contamination d'un ou de plusieurs individus. Terme souvent utilisé lors de l'analyse d'une épidémie. Synonyme de cas index.

**Pandémie** : Épidémie sévissant au niveau d'une zone géographique très étendue, à l'échelle d'un continent, d'un hémisphère ou du monde entier.

**Panzootie** : Pandémie chez l'animal.

**Pouvoir pathogène** : Capacité d'un virus à provoquer une maladie (cf. virulence).

**Récepteur cellulaire** : Structure présente à la surface d'une cellule sensible. Il présente une affinité élevée envers une structure superficielle d'une particule virale, autorisant l'attachement entre la cellule et le virus. Cet attachement est le premier facteur conditionnant le tropisme d'un virus pour un type cellulaire, un tissu, un organe ou un hôte particulier.

**TCID 50** : Dose infectieuse provoquant 50 % de lyse d'une culture cellulaire.

**Virulence d'un virus** : La virulence d'un virus est son aptitude à provoquer une maladie chez un hôte sensible donné. Virulence et pouvoir pathogène représentent une seule et même notion, envisagée, pour la virulence, du point de vue du virus (capacité à se multiplier), et pour le pouvoir pathogène, du point de vue de l'hôte (résistance et réaction offerte par le terrain).

# 1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

## 1.1 Contexte

Devant la menace de la survenue d'une grippe pandémique en 1999, l'OMS a élaboré les grandes lignes d'un plan de préparation à une pandémie de grippe en demandant à chaque État membre de s'en inspirer pour la rédaction de son plan national adapté au système de santé en place et aux réalités locales. Ce plan a été révisé en 2005, en raison notamment de la description de cas de transmission à l'homme du virus grippal d'origine aviaire de sous-type H5N1, faisant craindre l'émergence d'un virus capable de déclencher une nouvelle pandémie.

Le gouvernement français a arrêté en octobre 2004 un plan de prévention et de lutte contre une pandémie grippale qui a été actualisé en 2006, 2007, puis 2009, en fonction des avancées scientifiques et techniques, ainsi que des enseignements tirés des exercices nationaux. Ce plan, placé sous la responsabilité du Secrétariat Général de la Défense Nationale (SGDN), a pour objectif de protéger la population en métropole et en outre-mer, ainsi que les ressortissants français à l'étranger, contre une menace de pandémie grippale. Il vise également à préserver la continuité de la vie sociale et économique pendant la phase pandémique.

## 1.2 Objet de la saisine

C'est dans ce contexte que l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (AFSSET) a été saisie le 5 avril 2006 par le Délégué interministériel à la lutte contre la grippe aviaire (DILGA), **d'une demande d'évaluation des risques sanitaires liés à la présence de virus *Influenza* pandémique dans l'air des bâtiments et à sa dispersion éventuelle par les dispositifs de ventilation**. La lettre de saisine est présentée en annexe 1.

L'analyse préalable de la saisine a permis de préciser que l'évaluation du risque ne pouvait être réalisée que sur la base du comportement des virus *Influenza* actuellement connus et que le champ de la saisine ne devait pas être restreint à un hypothétique virus pandémique H5N1 mutant.

## 1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

Conformément à la procédure d'expertise collective de l'Agence s'appuyant sur l'utilisation de la norme NF X 50-110 relative à la qualité en expertise, la saisine a été présentée au comité d'experts spécialisés « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » (CES « milieux aériens »), lequel lors de sa séance du 6 octobre 2006 a accepté de prendre en charge le suivi de son instruction et a décidé qu'un groupe de travail soit constitué à cette fin.

Ce groupe de travail, nommé « VIP-ventilation », ainsi rattaché au CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » est composé de 10 experts dont certains ont été mobilisés au sein du CES « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques ».

Pour mener à bien ses travaux, le groupe de travail s'est réuni entre mars 2007 et décembre 2008 et a effectué une revue des articles scientifiques et techniques, complétée par des auditions d'experts dans les domaines de l'épidémiologie et des systèmes de ventilation.

Les travaux des experts ont été régulièrement rapportés oralement devant les CES par Monsieur Pierre André CABANES, président du groupe de travail.

Le rapport final a été adopté le 5 janvier 2009 par le CES « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques » et le 20 janvier 2009 par le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens ».

## 2 Généralités sur les virus *Influenza* ; émergence d'un virus pandémique

Les virus grippaux appartiennent à la famille des *Orthomyxoviridae*, laquelle comprend les types *Influenza A*, *B* et *C*. Ce rapport s'intéressera uniquement aux virus *Influenza A* (VIA), seuls potentiellement responsables de pandémies grippales.

Les VIA sont des virus enveloppés à ARN segmentés. De forme sphérique, leur taille est comprise entre 80 et 120 nm de diamètre. Leur enveloppe porte à sa surface deux protéines, nommées l'hémagglutinine (H) et la neuraminidase (N). A ce jour, 16 hémagglutinines et 9 neuraminidases différentes ont été identifiées. Ces protéines peuvent former entre elles des combinaisons du type HxNy. Actuellement, 24 combinaisons et donc 24 sous-types viraux ont été mis en évidence, dont 3 peuvent infecter l'homme (H1N1, H2N2 et H3N2) et 17 les oiseaux. Pour plus de détails sur les caractéristiques moléculaires des VIA et la physiopathologie des infections induites, le lecteur pourra se rapporter aux ouvrages rédigés par l'AFSSET<sup>1</sup> et l'AFSSA<sup>2</sup>.

Les virus *Influenza A* sont responsables de maladies essentiellement respiratoires pouvant se manifester sous différentes formes chez l'animal et chez l'homme :

- Chez l'animal, les virus *Influenza A* peuvent être responsables de gripes (grippe du porc, grippe du cheval, etc.). Dans le cas particulier des oiseaux, les aspects cliniques de la maladie sont très variés, d'une part en fonction de l'âge et de l'espèce aviaire, d'autre part en fonction de la pathogénicité du virus. Chez les volailles, sont distingués les virus *Influenza* aviaries faiblement pathogènes (VIAFP) et les virus *Influenza* aviaries hautement pathogènes (VIAHP). Ces derniers sont responsables de la « peste aviaire » se traduisant par des lésions hémorragiques et une forte mortalité. Ces VIAHP n'étaient pas considérés comme transmissibles à l'homme jusqu'en 1997, date de l'apparition du VIAHP de sous-type H5N1 (VIAHP(H5N1)) à Hong-Kong. Depuis, ce virus a provoqué des pneumopathies respiratoires plus ou moins sévères chez l'homme, notamment dans les pays asiatiques. Cependant, cette zoonose demeure exceptionnelle.
- Chez l'homme, la grippe dite saisonnière se manifeste par une infection respiratoire aiguë contagieuse. Cette maladie sévit le plus souvent sous forme d'épidémies, survenant habituellement entre la fin de l'automne et le début du printemps dans les pays tempérés. Elle coïncide avec la saison des pluies mais peut être présente toute l'année dans les pays tropicaux. La grippe peut se propager de manière exceptionnelle à un grand nombre d'individus de façon concomitante sur plusieurs continents. On parle dans ce cas de pandémie grippale. Ce fut le cas pour la grippe espagnole (1918-1919), la grippe asiatique (1957) et la grippe de Hong Kong (1968), pour lesquelles les sous-types antigéniques furent identifiés respectivement comme

---

1 Évaluation du risque sanitaire pour l'Homme lié à la présence du virus *Influenza* aviaire hautement pathogène de sous-type H5N1 ou d'un virus pandémique dérivé de celui-ci, dans divers effluents aqueux et eaux de surface, février 2007

2 Le risque de transmission à l'homme des virus *Influenza* aviaries, juillet 2002

H1N1, H2N2 et H3N2. Ces virus étaient très probablement d'origine aviaire (Neumann et *al.*, 2006).

Les mécanismes impliqués dans le déclenchement d'une pandémie grippale ne sont pas univoques ni définitivement élucidés à ce jour. Ils vont dépendre, notamment, de la virulence et de la transmissibilité interhumaine du virus (liées entre autres à sa structure moléculaire et à la présence de récepteurs reconnus par le nouveau virus dont le nombre doit être suffisant dans les tissus cibles) et de la naïveté immunitaire au nouveau virus des populations exposées.

De fait, les VIA responsables de pandémie ont probablement émergé selon l'un des deux mécanismes suivants :

- par réassortiment génétique entre un virus aviaire et un virus humain après passage chez le porc ou directement chez l'homme. Cet événement est brutal et inopiné, donc difficile à prévoir. Ce fut le cas des gripes asiatique et de Hong-Kong.
- par l'introduction directe *in toto* d'un virus aviaire dans la population humaine avec adaptation progressive à bas bruit de sa capacité de transmission interhumaine. Celle-ci peut s'optimiser au fil du temps par des mutations aléatoires du virus aviaire et/ou plus brutalement par réassortiment du virus aviaire avec un virus *Influenza* humain. Ce mécanisme est probablement en cause pour la grippe espagnole (Tautenberger, 2005).

L'infection humaine par le VIAHP(H5N1) observée depuis 1997 essentiellement dans les pays d'Asie ne peut être qualifiée de pandémie. Il s'agit d'une zoonose, appelée chez l'homme « grippe aviaire », qui se manifeste par une pneumopathie sévère avec défaillance multi-organique souvent mortelle. Le nombre de cas documentés est limité, car l'efficacité de la transmission interhumaine du VIAHP(H5N1) est faible. Cela est dû entre autres au fait que ce virus n'utilise pas le même récepteur cellulaire que le virus grippal humain saisonnier. Le VIAHP(H5N1) reconnaît les récepteurs comportant des acides sialiques de type  $\alpha$ -2,3 uniquement présents, et en petit nombre, dans l'arbre respiratoire inférieur (bronchioles et alvéoles) alors que les virus humains interagissent avec les récepteurs comportant des acides sialiques de type  $\alpha$ -2,6 présents sur les cellules des voies respiratoires supérieures (muqueuses nasale, laryngée, trachéale et bronchique supérieure (Shinya et *al.*, 2006 ; Van Riel, 2006). Cette localisation basse des récepteurs  $\alpha$ -2,3 suppose un mécanisme d'infection par aérosols, ce qui est un des facteurs limitant la transmission interhumaine des VIAHP (H5N1). De plus, du fait de cette localisation profonde des cellules qui produisent des virus infectants, l'émission de ces derniers par l'individu infecté est limitée. A l'inverse, l'émergence d'un virus *Influenza* proche d'un sous-type viral humain actuel (H1N1 ou H3N2) qui pourrait se lier aux récepteurs présents dans l'épithélium des voies aériennes supérieures faciliterait l'émergence d'une pandémie grippale.

Aujourd'hui, la panzootie sévissant en Asie, en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique, due au VIAHP(H5N1), a constitué pour l'OMS un signe d'alerte fort de l'émergence possible d'une nouvelle pandémie grippale humaine. Cependant, nul n'est en mesure aujourd'hui d'affirmer que le nouveau virus émergent sera issu de ce sous-type. C'est pourquoi il convient d'évaluer la situation en tenant compte à la fois des particularités des virus *Influenza* A humains et animaux.

### 3 Modes de transmission

Les caractéristiques moléculaires d'un futur virus *Influenza* pandémique n'étant pas encore connues au moment de la rédaction du rapport, il est difficile de prévoir son mode de transmission, sa dose infectieuse et son comportement dans le milieu aérien. Afin d'appréhender son comportement et son risque de propagation par les systèmes de ventilation, le groupe de travail a analysé l'ensemble de la littérature se rapportant aux virus respiratoires et plus particulièrement aux virus grippaux.

L'analyse de l'ensemble des données disponibles relatives aux modes de transmission des virus *Influenza A* chez l'homme, ainsi que de deux articles de synthèse (Brankston, 2007; Tellier, 2007), ayant fait l'objet de plusieurs commentaires dans la revue *The Lancet* en 2007, permet de mettre en évidence quatre voies de transmission possibles :

- **Contact direct** : transmission résultant d'un contact physique entre un individu infecté ou colonisé et un hôte sensible.
- **Contact indirect** : transmission à un hôte sensible *via* des mains ou des objets contaminés.
- **Transmission par gouttelettes** : transmission de proximité par l'intermédiaire de gouttelettes générées par un individu infecté, lors de la toux, des éternuements, de la parole.
- **Transmission aérienne** : transmission par des aérosols émis par les voies respiratoires ou résultante de l'évaporation de gouttelettes formant ainsi des *droplet nuclei*. Ces aérosols sont largement dispersés par les mouvements de l'air et peuvent être inhalés par des hôtes sensibles se trouvant à distance de l'individu source.

L'hypothèse de la transmission aérienne, proposée par Tellier est apparue dans un contexte où les gouttelettes étaient jusqu'alors considérées comme seul mode de transmission de la grippe, avec un débat focalisé sur l'intérêt du port du masque de protection respiratoire.

**La transmission à distance par aérosols étant au cœur de la question posée par la saisine, le groupe de travail a jugé nécessaire d'analyser également ce dernier mode de transmission.**

Selon un cheminement logique, le groupe de travail a débuté par une caractérisation des émissions des particules issues des voies respiratoires chez l'homme, a poursuivi par l'étude des facteurs environnementaux pouvant influencer la survie des virus, puis a recherché les données humaines épidémiologiques et expérimentales sur le VIA ou sur d'autres virus et les données animales, pour aboutir à une synthèse.

#### 3.1 Caractérisation des émissions de particules par la sphère oro-nasale chez l'homme

Afin de mieux comprendre comment les virus pourraient être transmis par les aérosols, il convient de déterminer :

- les caractéristiques des émissions de particules par les voies respiratoires ;
- le comportement des gouttelettes et des aérosols émis, notamment en fonction des conditions environnementales (humidité, température).

### 3.1.1 Caractéristiques des particules émises par les voies respiratoires : concentration et granulométrie

- **Concentration**

Les voies respiratoires peuvent émettre une certaine quantité de particules de composition indéterminée (débris cellulaires, mucus, etc.). Il ressort de l'analyse des publications que :

- la respiration simple émet 10 à 10<sup>4</sup> particules par litre d'air expiré (Fabian et *al.*, 2008), avec une forte disparité selon les individus (Edwards et *al.*, 2004). Il y a une prédominance des particules de diamètre inférieur à 1 µm (Fabian et *al.*, 2008 ; Morawska et *al.*, 2006) ;
- lors de la parole, un individu peut émettre de 1 à 5 000 particules par minute, d'une taille allant jusqu'à 60 µm (Greene, 1962 ; Loudon, 1967) ;
- la toux génère 10<sup>3</sup> à 10<sup>4</sup> particules, de tailles comprises entre 0,5 et 30 µm (Loudon, 1967 ; Duguid, 1946 ; Papineni et Rosenthal, 1997 ; Tang et *al.*, 2006 ; Fairchild, 1987) ;
- un éternuement génère environ 10<sup>6</sup> particules de 0,5 à 16 µm. (Bourdillon et *al.*, 1941 ; Duguid et *al.*, 1946 ; Gerone, 1966 ; Tang et *al.*, 2006 ).

- **Granulométrie**

La granulométrie des particules émises lors d'une toux est majoritairement inférieure à 2 µm (particules bronchiques). L'air expiré contient plus de 95 % de particules submicroniques. Cependant en masse, ce sont les particules les plus grosses qui sont prépondérantes. Pour une toux, environ 7 mg de particules seraient émises, dont seulement 3 % en masse de particules submicroniques (Zhu et *al.*, 2006).

Une étude récente (Morawska et *al.*, 2006) montre que l'on peut distinguer trois domaines de taille de particules émises par la sphère oro-pharyngée, hors toux et éternuements :

- un premier lié à la respiration simple, centré sur 0,8 µm. Ce premier mode est largement prépondérant en nombre de particules émises ;
- un second lié à la parole (du fait des vibrations des cordes vocales) : entre 2 et 3 µm ;
- un dernier, incertain, lié à la salive et centré autour de 10 µm.

### 3.1.2 Comportement des gouttelettes et des aérosols après émission

Lors de la toux, les particules sont expectorées avec une vitesse initiale moyenne de 11 m.sec<sup>-1</sup> (maximum 22 m.sec<sup>-1</sup>). Des modélisations et des mesures empiriques montrent que parmi les particules expectorées :

- celles d'un diamètre initial inférieur à 30 µm envahissent rapidement la pièce ;
- celles de diamètre supérieur à 200 µm se déposent dans un rayon de 2 mètres.

Une seule étude s'est intéressée à l'évaporation des particules émises par la sphère oro-pharyngée (Morawska et *al.*, 2006). Bien qu'elles contiennent des solutés divers (mal connus car peu étudiés), le comportement de ces particules serait similaire à celui de gouttelettes d'eau pure. Des études expérimentales montrent que des gouttelettes d'eau pure de taille

comprise entre 1 et 50  $\mu\text{m}$  s'évaporent très rapidement, quelle que soit l'hygrométrie du milieu (Baron et Willeke K, 2001).

Ainsi, même si des facteurs comme la composition de la salive ou les débris biologiques divers ont sans doute une influence, les particules s'évaporent très rapidement pour atteindre une taille minimale, dite de « *droplet nuclei* ».

En dehors de l'évaporation, il n'existe pas de données sur les agrégations possibles de particules entre elles, ou avec celles déjà présentes dans l'air ambiant. Il en est de même pour la désagrégation des particules.

### 3.1.3 Caractéristiques des particules contenant des micro-organismes

Les études expérimentales visant à mesurer les émissions de micro-organismes cultivables lors de toux ou d'éternuements sont relativement rares. Six publications antérieures à 1970 traitent ce sujet (Bourdillon et al., 1941 ; Duguid et al., 1946 ; Greene et al., 1962 ; Loudon et al., 1967 ; Gerone et al., 1966 ; Couch et al., 1966). L'une de ces études montre qu'en une minute de parole, jusqu'à 5000 micro-organismes cultivables sont émis (Greene et al., 1962). Les publications postérieures à 1970 ne font que reprendre, parfois de façon discutable, ces données initiales.

Une seule équipe de recherche a récemment publié des résultats sur l'émission de particules de virus grippal par des individus infectés (Fabian et al., 2008). Cette étude se limite à l'air expiré lors de la respiration normale (sans toux, ni éternuement) et mesure l'émission de génome de virus grippal<sup>3</sup>. Les résultats montrent une excrétion de 3 à 20 génomes par minute. Le nombre de particules virales émises lors de toux ou d'éternuements serait plus élevé, si la proportion de particules infectées reste constante.

Les autres publications sur les émissions virales sont très rares. Un individu infecté par un coxsackievirus émettrait jusqu'à 160 particules virales infectieuses lors d'une toux ou d'un éternuement (Couch et al., 1966 ; Downie et al., 1965)

Afin d'estimer l'émission virale, une autre approche consisterait à extrapoler les données (concentration et granulométrie) d'émission anthropique de particules (toux, éternuement, parole ou simple respiration) au moyen des titres viraux mesurés dans les sécrétions bronchiques ou oro-pharyngées<sup>4</sup>.

Une estimation grossière, basée sur les données présentées dans ce chapitre, montre que pour une pièce de quelques dizaines de  $\text{m}^3$  occupée par quelques personnes infectées, la concentration ambiante en aérosol de virus grippal issu de la seule respiration atteindrait en quelques heures un ordre de grandeur de 0,1 à 10 virus par litre d'air<sup>5</sup>.

La prise en compte de la toux et des éternuements augmenterait grandement ces valeurs. Cependant, aucune donnée expérimentale n'a été retrouvée. Une estimation est impossible sans définir les paramètres critiques (nombre de personnes infectées, taille et aéraulique de la pièce, durée d'occupation, etc.). Une étude empirique menée avec des personnes infectées par un coxsackievirus est cohérente avec cette estimation (Couch et al., 1966).

L'impact en termes de transmission dépend de la biologie du virus pandémique (en particulier sa dose infectieuse par aérosol et ses récepteurs physiologiques).

---

3 Cette mesure ne reflète pas nécessairement le caractère infectieux des particules.

4 Les sécrétions nasales contiennent de 102 à 107 TCID<sub>50</sub>/ml de virus grippal au deuxième jour de l'infection (Douglas R. 1975 cité par Fabian, 2008).

5 Considérant par exemple le bureau de 40  $\text{m}^3$  occupé par 2 personnes respirant simplement (sans toux, ni éternuement) et émettant 20 virus/minutes pendant 4 heures (240 min), le calcul donne une concentration de :  $(2 \times 240 \times 20) / 40.10^3 = 0,24$  virus /litre d'air. (Sans tenir compte du renouvellement de l'air).

L'analyse bibliographique montre que l'émission de particules virales grippales est possible lors de la toux, des éternuements ou de la simple respiration.

Ces particules ont des tailles variables, la grande majorité étant inférieure à 1 µm. De plus, elles s'évaporent rapidement. Celles dont la taille initiale est inférieure à 30 µm (aérosols) peuvent se disperser dans une pièce.

Des particules plus grosses (gouttelettes) sont également émises et se déposent dans un rayon de quelques mètres. Bien que prépondérantes en masse, elles sont minoritaires en nombre.

### 3.2 Viabilité des virus à l'intérieur des aérosols et en fonction des conditions environnementales

Afin d'évaluer le risque de contamination d'un individu par des particules virales infectieuses contenues dans un aérosol, il convient de répondre aux questions suivantes :

- Quels paramètres environnementaux influencent la conservation du pouvoir infectieux des particules virales aérosolisées ?
- Après quel délai le pouvoir infectieux viral est-il inactivé dans l'environnement intérieur durant la période hivernale de morbidité grippale ? En effet, une contamination virale à distance nécessite le maintien du pouvoir infectieux du VIA durant le temps mis par les virus aérosolisés à parcourir cette distance.

Les caractéristiques moléculaires du futur virus pandémique n'étant pas connues, une extrapolation des données relatives aux virus grippaux connus peut apporter certains éléments de réponse.

De nombreuses études expérimentales, souvent très anciennes et dont les conclusions sont parfois contradictoires, se sont intéressées à mesurer la résistance du pouvoir infectieux des VIA dans différentes conditions environnementales d'humidité relative, de température et d'autres agents physico-chimiques, comme les rayonnements UV.

Ces études ont essentiellement mis en jeu des souches virales dites de laboratoire, obtenues après un grand nombre de passages en culture cellulaire, sur œufs de poule embryonnés ou sur animaux. Or, du fait d'une adaptation progressive constante du virus à son hôte, donc aux supports de culture sus-cités, le pouvoir pathogène des souches virales utilisées dans certaines études n'était donc pas toujours assimilable à celui des virus infectant naturellement l'homme.

Les travaux expérimentaux rapportés ci-après ont été conduits sur des aérosols chargés artificiellement en virus. Le pouvoir infectieux résiduel de ces aérosols (observé après action de l'agent physico-chimique considéré) est mesuré soit par titrage en culture cellulaire ou sur œufs de poule embryonnés, soit par évaluation de la mortalité ou examen histologique des lésions pulmonaires de souris exposées à l'aérosol. Dans certains cas, des taux de transmission de l'infection ont été mesurés entre des animaux contacts et des animaux index préalablement exposés à des aérosols.

### 3.2.1 Influence de l'humidité et de la température

La résistance des VIA augmente lorsque le pourcentage d'humidité relative (HR) et la température diminuent. Ainsi, à 20-25° C, la résistance des VIA est plus grande pour 20 % de HR que pour 50 % de HR. (Lester, 1948 ; Schaffer et *al.*, 1976 ; Harper, 1961 ; Schulmann et Kilbourne, 1962 ; Schulman et Kilbourne, 1963 ; Loosli et *al.*, 1943 ; Hemmes et *al.*, 1960 ; Benbought, 1971 ; Lowen et *al.*, 2007). Au-delà de 50 % de HR, les données divergent. Selon les auteurs, à 80 % de HR, le pouvoir infectieux viral serait plus ou moins résistant (Lester, 1948 ; Schaffer et *al.*, 1976 ; Lowen et *al.*, 2007). Toutefois cette résistance serait toujours moins importante à 80 % plutôt qu'à 20 % de HR.

A 50 % de HR, la cinétique de l'inactivation virale est bi-phasique, rapide durant les 15 premières minutes, ralentie ensuite (Schaffer et *al.*, 1976).

D'un point de vue quantitatif, Schaffer et *al.* (1976) montre qu'une heure après l'émission d'un aérosol maintenu à 21°C, la perte du pouvoir infectieux du virus est inférieure à 1 log à une HR de 20 % et atteint 2 log à une HR de 50 %. Harper (1961) montre que dans des conditions d'HR de 30 à 40 % et de température de 20 à 24° C, 14 % des particules virales conservent leur pouvoir infectieux après un séjour de 23 h dans l'aérosol.

Le rôle de la température sur le pouvoir infectieux des virus *Influenza* a été étudié récemment chez le cobaye par Lowen et *al.* (2007). Cette étude montre que pour une HR de 50 % la transmission du virus est plus fréquente à 5 °C qu'à 20 °C. Cette transmission n'est plus observée à 30 °C pour une HR de 35 %.

### 3.2.2 Influence des surfaces solides

Les gouttelettes de grandes tailles chargées en virus, émises dans l'atmosphère par un sujet infecté sédimentent puis se déposent. Les particules virales peuvent être remises en suspension dans l'air, par exemple lors d'un balayage vigoureux ou être transférées sur les doigts qui contamineront les muqueuses sensibles (Loosli et *al.*, 1943).

Bean et *al.* (1982) ont montré que pour une HR de 35 à 49 % et à une température de 28 °C, des VIA gardent leur pouvoir infectieux pendant les 48 heures qui suivent leur dépôt sur des surfaces non poreuses (acier, plastique) et jusqu'à 12 heures sur des surfaces poreuses (tissus, papier). Cependant, sur les mains artificiellement contaminées par une charge virale élevée, les virus ne demeurent infectieux que 5 minutes. En revanche, des virus infectieux déposés sur une surface inerte peuvent contaminer les mains jusqu'à 24 heures après dépôt.

L'hygrométrie influence également la résistance des VIA lorsqu'ils sont soumis à une dessiccation sur un support solide. Ainsi, après dessiccation à 20°C sur un support inerte durant 2,5 heures, la réduction du titre viral est supérieure à 84% de HR comparée à 20% de HR (Parker et *al.*, 1944 ; Buckland et Tyrrell, 1962).

### 3.2.3 Influence des rayonnements ultra-violet

La sensibilité des VIA à l'action des rayonnements ultra-violet (UV) (Hollaender et Oliphant, 1944) et de la lumière (Skinner et Bradish, 1954) est connue de longue date.

Plusieurs études chez l'homme et l'animal ont démontré que les rayonnements UV diminuent le pouvoir infectieux.

Ainsi, il a été montré que durant la pandémie de grippe asiatique, la morbidité grippale chez des patients tuberculeux hospitalisés était proportionnellement corrélée avec la présence ou l'absence de rayonnements UV dans les plafonniers des bâtiments (Mc Lean, 1961 ; Riley, 1974).

Par ailleurs, la mortalité des souris soumises à un aérosol de VIA irradié par des rayonnements UV diminue lorsque la dose d'UV augmente (Jakab et Night, 1982).

L'hypothèse selon laquelle les radiations UV provenant du rayonnement solaire seraient un agent virucide est soutenue par Mims en 2005. En effet, cet auteur rapporte l'augmentation de l'incidence des hospitalisations pour grippe lors de l'été 2005 au Brésil, suite à la présence de fumées polluantes ayant réduit de façon prolongée l'éclairage solaire.

La plus grande résistance des VIA vis-à-vis des conditions environnementales rencontrées en hiver, à savoir une faible humidité relative, en raison du chauffage artificiel qui assèche l'air, une température moyenne de 20° C et un appauvrissement du rayonnement UV, rendrait compte de l'incidence hivernale des infections grippales. Ainsi, la période durant laquelle la survie du virus dans l'air est optimale correspond à une période de morbidité grippale plus importante (Knight, 1980 ; Hemmes et al., 1960 ; Buckland et Tyrrell, 1962, Lowen et al., 2007 ; Sagripanti et Lytle, 2007).

En conclusion, plusieurs études démontrent que la résistance des VIA diminue lorsque l'HR et/ou la température augmentent. Il apparaît qu'à une hygrométrie de 30 à 40 % et à une température ambiante de 20-25° C, conditions régnant généralement dans l'environnement intérieur durant la période hivernale de morbidité grippale, une partie non négligeable des particules virales conservent leur pouvoir infectieux sous forme d'aérosol dans l'atmosphère ambiante pendant plusieurs heures. Des particules virales aérosolisées pourraient donc être transportées à distance par la ventilation durant quelques heures après leur émission par un individu infecté, tout en conservant leur pouvoir infectieux.

### 3.3 Données humaines relatives à la transmission des virus *Influenza A*

Les études recensées sont soit des études épidémiologiques en situation réelle d'épidémie de grippe ou de pandémie, soit des études expérimentales de transmission du virus grippal.

#### 3.3.1 Données épidémiologiques

Neuf études épidémiologiques ont été analysées, certaines portant sur des épidémies saisonnières et d'autres sur la pandémie de 1957. Elles ont été étudiées sous l'angle des mécanismes possibles de transmission du virus. Cependant, il est souvent difficile de déterminer lequel de ces mécanismes est prépondérant.

Une étude, effectuée dans un hôpital pendant la pandémie de 1957-1958 (Blumenfeld et al., 1959), n'est pas concluante, la transmission ayant pu se faire par gouttelettes, contact indirect ou aérosol.

Trois études plaident en faveur d'une transmission par contact indirect. Ainsi en est-il de l'épidémie de grippe survenue dans une maison de retraite, au cours de laquelle les sujets les plus touchés ont été ceux qui nécessitaient le plus de soins, suggérant une transmission d'un patient à l'autre par le personnel soignant (Morens et Rash, 1995).

Il en est de même pour deux épidémies survenues dans des unités néonatales (Munoz et al., 1999 ; Cunney et al., 2000). Dans l'étude de Munoz, le rôle de la transmission par

gouttelettes est également mis en avant, puisque l'épidémie s'est arrêtée après la prise de mesures visant à limiter les contacts et l'exposition aux gouttelettes.

Deux études mettent en avant le rôle de la transmission par gouttelettes ou plus exactement, de la proximité entre sujet infecté et sujet contact. La première décrit une épidémie en milieu carcéral, au cours de laquelle la chaîne de contamination a pu être tracée (Awofeso et al., 2001). La seconde étude rapporte également une épidémie de grippe dans deux avions transportant des militaires, au cours de laquelle les sujets n'auraient pas été contaminés par contact, mais par voie aérienne, soit par des gouttelettes ou des aérosols fraîchement émis (Klontz et al., 1989).

Trois études sont souvent citées comme étant en faveur de l'hypothèse de transmission par aérosol. La plus connue est celle survenue dans un avion où 36 personnes ont été contaminées, alors que le système de ventilation était en panne (Moser et al., 1979). Certes la propagation des aérosols est possible dans ce cas, contrairement au cas cité plus haut, mais il faut également noter la proximité entre les personnes dans un avion, surtout à l'arrêt, où les passagers se déplacent sans contrainte. Ces derniers ont pu être atteints soit par gouttelettes, soit par inhalation d'aérosols. Le taux d'attaque élevé comparé à celui des cas décrits par Klontz peut peut-être s'expliquer ainsi. Une seconde étude met en évidence un taux de transmission plus faible dans un bâtiment hospitalier sans recyclage d'air, par rapport à deux autres bâtiments avec recyclage, évoquant la transmission aérienne *via* les systèmes de ventilation. Cependant, d'autres différences entre les bâtiments pourraient être à l'origine de cette observation (Drinka et al., 1996). Cependant, une nouvelle analyse de ces épidémies menée avec les données de cinq années supplémentaires ne retrouve toutefois pas cette différence (Drinka et al., 2004). Enfin, l'étude de Mc Lean, 1961<sup>6</sup>, suggère une transmission du virus *via* des aérosols. En effet, les lampes UV placées au plafond des chambres ont permis de réduire cette transmission. Or, les UV ne sont pas efficaces sur les transmissions de proximité en raison d'un contact trop rapide entre émetteur et receveur. En revanche, il est connu que les UV inactivent les aérosols grippaux (cf. chapitre 3.2.3).

L'ensemble de ces études suggère un rôle important de la proximité entre les sujets index et les hôtes sensibles, qu'il s'agisse de transmission par contact, gouttelettes ou aérosols de proximité. Cependant, il est à noter que les conclusions tirées de l'observation des épidémies naturelles sont affectées de nombreux biais :

- non prise en compte des modalités de circulation des soignants et/ou des patients, ni de l'existence préalable chez les individus concernés d'anticorps, d'une vaccination ou d'une thérapeutique ;
- non description du système de ventilation ;
- absence de groupes de patients témoins et d'évaluation statistique des faits observés.

---

6 Jordan WS Jr. Discussion after paper of the mechanisms of spreads of Asian influenza. Am Rev Respir Dis. 1961 83 : 36-8

Compte tenu de ces études, la proximité entre l'individu source et l'individu exposé, bien que la distance précise ne soit pas déterminée, semble être un élément facilitant ou favorisant la transmission.

Ainsi, dans le cadre de la saisine, le débat transmission par gouttelettes ou aérosols peut être avantageusement assujéti au débat transmission de proximité ou à grande distance. La notion de proximité est élargie pour inclure des transmissions par aérosols au sein d'une même zone, mais à une distance supérieure à deux mètres. En ce qui concerne le risque de transmission à distance, c'est à dire entre deux zones (*via* des systèmes de ventilation ou pas), les études épidémiologiques disponibles ne permettent pas de conclure.

### 3.3.2 Données expérimentales

Plusieurs études expérimentales ont permis d'étudier la transmission du virus grippal par instillation intra-nasale ou par aérosol (Jao et *al.*, 1970, Murphy et *al.*, 1972, Alford et *al.*, 1966, Little et *al.*, 1979, Henlé et *al.*, 1946). Les résultats de ces études semblent indiquer que la contamination par voie nasale est moins efficace que par aérosol, car elle nécessite un inoculum plus important (respectivement 30 à 320 versus 0,6 à 3 TCID<sub>50</sub>). Il est à noter que ces études n'ont pas été réalisées simultanément dans le même laboratoire, ni avec la même souche virale. Par ailleurs, elles ne permettent pas de répondre à la question de l'infectiosité d'un aérosol à plus grande distance.

### 3.4 Données humaines relatives à la transmission d'autres virus respiratoires

Le groupe de travail s'est également intéressé aux modes de transmission d'autres virus respiratoires, tels que le virus responsable du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS), les virus responsables de la rougeole et de la varicelle, les coxsackievirus, rhinovirus et adénovirus. Cet examen peut permettre au travers d'un raisonnement analogique, de mieux appréhender les modes potentiels de transmission d'un futur virus pandémique grippal.

#### 3.4.1 Données épidémiologiques

##### 3.4.1.1 Virus du SRAS

Les données de la littérature rapportent que le virus du SRAS se transmet, tout au moins lors d'épidémies survenant à l'hôpital, surtout par gouttelettes et plus rarement par contact direct ou par les surfaces contaminées, c'est-à-dire de façon similaire au virus grippal. (Chan-Yeung et *al.*, 2003 ; Liang et *al.*, 2003 ; Leung et *al.*, 2003 ; Khater et Moorman, 2003 ; Varia et *al.*, 2003 ; Sampathkumar et *al.*, 2003) ; Li et *al.*, 2004 ; Yu et *al.*, 2004),

Dans un avion, la contamination par le virus du SRAS de 22 passagers sur 119 dans un périmètre de 2,3 mètres du patient index, confirme le rôle des gouttelettes, mais suggère également la possibilité d'une transmission par aérosol (Yu et *al.*, 2004).

L'analyse détaillée des modalités de survenue de l'épidémie de SRAS en 2003 dans le complexe d'habitation d'Amoy Gardens à Hong Kong, a conduit à émettre l'hypothèse d'une contamination virale par voie aérienne *via* une aérosolisation du virus, générée à partir des

selles du patient index atteint de diarrhées. Cette épidémie a contaminé plus de 300 personnes dans 6 bâtiments de 36 étages (Yu et *al.*, 2004 ; Li et *al.*, 2004).

### 3.4.1.2 Virus de la rougeole et de la varicelle

On admet que ces deux virus qui peuvent induire accessoirement une infection respiratoire, se transmettent principalement par voie aérienne. La possibilité d'une contamination par un contact direct avec le patient source, voire avec des surfaces contaminées n'est pas exclue.

Par exemple, l'analyse d'une épidémie nosocomiale de varicelle a montré qu'un patient en isolement strict dans une chambre maintenue en surpression, fut à l'origine de la contamination, en l'espace d'une seule après-midi de nombreux enfants hospitalisés dans plusieurs autres chambres, suggérant une transmission par voie aérienne (Gustafson et *al.*, 1982). Une autre étude a mis en évidence que de l'ADN des particules du virus de la varicelle était présent dans la majorité des échantillons d'air prélevés dans la chambre d'un patient, jusqu'à 5,5 mètres de son lit pendant les 6 jours suivant le début de son éruption varicelleuse (Sawyer et *al.*, 1994).

Une enquête menée dans différents établissements scolaires aux États-Unis a montré que l'installation à demeure de systèmes de désinfection de l'air par des rayonnements UV a permis de protéger les écoliers lors de la survenue d'une importante épidémie de rougeole, (Wells et *al.*, 1942). Enfin, la possibilité d'une recirculation des particules virales aérosolisées *via* le système de ventilation a été fortement suspectée lors d'une épidémie de rougeole survenue dans une école américaine (Riley et *al.*, 1978).

## 3.4.2 Données expérimentales

L'étude de Couch et *al.*, (1966), visant à déterminer le rôle respectif des gouttelettes et des aérosols dans la transmission des infections respiratoires virales dues aux coxsackievirus, rhinovirus et adénovirus, conclut à la réalité du rôle des aérosols.

En termes de dose infectieuse, l'inoculation semble plus efficace par voie nasale que par aérosol pour les coxsackievirus et les rhinovirus, alors qu'un résultat inverse est observé pour les adénovirus. En revanche, de même que pour le virus grippal, l'inoculation par aérosol se traduit par une infection plus sévère.

Est également rapporté dans cette étude la possibilité d'infecter « de façon naturelle » des volontaires sains par voie aérienne, en les exposants à l'air ambiant d'une pièce où séjournent des individus expérimentalement infectés.

## 3.4.3 Discussion

Portés par des gouttelettes, les coxsackievirus, les rhinovirus et le virus du SRAS atteignent la muqueuse nasale, site privilégié pour leur multiplication et induisent une infection respiratoire. Transmis par aérosol, les adénovirus, les virus de la rougeole et de la varicelle et parfois le virus du SRAS, parviennent jusqu'au tractus respiratoire profond provoquant une infection généralisée, facilitée par les échanges respiratoires air/sang (Sakaguchi et *al.*, 1986 ; Walz-Cicconi et *al.*, 1986).

Ainsi, d'un point de vue épidémiologique, les virus *Influenza* humains saisonniers se rapprocheraient des coxsackievirus et des rhinovirus, alors que les VIAHP(H5N1), semblent

plus proches des adénovirus, des virus de la varicelle et de la rougeole. Les premiers trouvent leurs récepteurs cellulaires surtout dans le tractus respiratoire supérieur ; l'exposition à ces virus conduit à une infection localisée souvent bénigne et sans virémie. Les seconds trouvent chez l'homme leurs récepteurs dans la muqueuse du tractus respiratoire inférieur (Van et *al.*, 2006 ; Shinya et *al.*, 2006) ; ils y induisent une pneumonie sévère et une dissémination extra-pulmonaire conduisant à une maladie généralisée (Yen et *al.*, 1998 ; Chotpitayasumondh et *al.*, 2005 ; Peiris et Guan., 2007).

Les virus respiratoires non grippaux tels que les rhinovirus, les coxsackievirus et le virus du SRAS contaminent majoritairement *via* le dépôt de gouttelettes dans le naso-pharynx. Leur administration expérimentale par voie aérienne serait responsable d'une maladie plus sévère. Les virus de la rougeole, de la varicelle et parfois du SRAS se déposent dans le tractus respiratoire profond en provoquant une infection généralisée. Les virus *Influenza* humains saisonniers et les VIAHP(H5N1) utiliseraient respectivement ces deux voies de contamination.

### 3.5 Données animales relatives à la transmission des virus *Influenza A*

#### 3.5.1 Virus *Influenza A* hautement pathogène chez les volailles

Chez les volailles, deux modes de transmission des virus *Influenza A* hautement pathogène sont connus : digestif et aérien. Toutefois peu d'études épidémiologiques ont permis de quantifier l'importance relative de chacun de ces modes de transmission.

Alors que la propagation d'un VIAHP(H5N1) était considérée comme rapide dans les élevages aviaires, une observation japonaise signale le cas d'un foyer de VIAHP(H5N1), où la propagation du virus a été relativement lente pendant les 10 premiers jours. L'auteur de l'étude indique par ailleurs que les animaux ne présentaient ni signes respiratoires ou lésionnels, ni de forte mortalité permettant de suspecter la maladie.

Il a résulté de cette observation une étude expérimentale, en vue d'examiner le risque de transmission par contact et par aérosol du VIAHP(H5N1) chez de jeunes poulets placés dans deux cages séparées de 10 cm. Cette étude a montré que la transmission au sein d'une même cage était nulle lorsqu'un seul poulet était infecté, mais aussi qu'elle augmentait proportionnellement au nombre de poulets infectés placés avec les témoins. Enfin, l'auteur rapporte que l'absence de contact entre les animaux n'annihilait pas la transmission entre eux, mais la réduisait (Tsukamoto et *al.*, 2007). Cette étude montre que la transmission du VIAHP(H5N1) se fait notamment par voie aérienne et que celle-ci est fonction du nombre d'individus infectés présents dans une même pièce.

#### 3.5.2 Virus *Influenza A* chez d'autres espèces animales

Quelques études expérimentales ont été menées sur des modèles animaux afin de comprendre les mécanismes de la transmission par voie aérienne de la grippe et déterminer l'importance relative des gouttelettes et des aérosols : Andrewes et Glover, 1941 ; Schulman et Kilbourne, 1962 ; Lowen et *al.*, 2006).

Ces études exposaient des animaux contacts à des animaux contaminés par la grippe. Elles apportent des éléments en faveur d'une transmission possible par aérosols.

Ainsi, Andrewes et Glover ont placé des furets infectés et des furets exposés dans des cages grillagées, séparées et placées à des distances et des hauteurs différentes. Les furets exposés sont situés à un niveau supérieur par rapport aux furets infectés, afin que les grosses gouttelettes émises lors des étternuements des animaux infectés ne puissent les atteindre. La transmission a lieu à une distance totale de l'ordre de 1,5 mètres avec une distance verticale de l'ordre de 1 mètre. De plus grandes distances n'ont pas été étudiées du fait des dimensions limitées du box d'expérience. Dans cette expérience, rien n'est indiqué en ce qui concerne la ventilation.

Dans une autre série d'expériences, Andrewes et Glover ont placé les cages d'un furet infecté et d'un furet exposé aux deux extrémités de conduits où la circulation de l'air est maîtrisée, en direction (du furet infecté vers le furet exposé) et en vitesse. Trois conduits de formes différentes ont été construits : linéaire (1 mètre entre les furets), en U (longueur totale environ 2,5 mètres) et en S (dimensions non indiquées). La transmission virale a lieu dans les trois cas, pour des vitesses d'air inférieures à 4 m/min. A ces faibles vitesses, les auteurs estiment qu'il est peu probable que les gouttelettes émises par les furets infectés soient entraînées dans le flux d'air et atteignent le furet contact, mais pensent qu'elles doivent plutôt s'impacter sur les parois des conduits sinueux. Selon eux, seuls les aérosols peuvent être transportés par l'air dans les conduits en U et S et être à l'origine de la transmission virale.

Schulman et Kilbourne, (1962) ont montré l'existence d'une transmission du virus grippal entre souris : un groupe de souris exposées était placé à côté d'un groupe constitué de souris infectées et de souris exposées en interposant deux écrans grillagés distants de 2 cm. Aucune différence significative entre les deux groupes de souris exposées n'a été observée en ce qui concernait la probabilité de contracter la grippe, ce qui était en faveur d'une transmission aérienne de la grippe. Ces auteurs ont répété cette expérience en faisant varier le taux de ventilation. Ils ont constaté que la transmission diminuait lorsque la ventilation augmentait. Ce résultat est également en faveur d'une transmission essentiellement par le biais d'aérosols. En effet, lorsque la ventilation augmente, la concentration en aérosols diminue, réduisant la probabilité de la transmission entre les souris. Si la transmission par gouttelettes avait été le mode prépondérant de transmission, le taux de transmission de la grippe chez les souris n'aurait pas été affecté par l'augmentation du taux de ventilation.

Plus récemment, Lowen et *al.*, (2006) ont évalué l'intérêt du modèle cobaye pour l'étude de la transmission des virus grippaux chez l'homme. Ils ont tout d'abord montré la grande susceptibilité des cobayes à l'infection par une souche récente A/Panama/2007/99 (H3N2). Ils ont établi successivement que la transmission entre cobayes avait lieu lorsque les animaux infectés et les animaux exposés étaient placés dans la même cage, dans des cages adjacentes et lorsque les cages des animaux exposés étaient situées 90 cm en aval des cages des animaux infectés par rapport au sens de la ventilation. Toutefois, la transmission n'avait pas lieu lorsque les positions des cages des cobayes infectés et celles des exposés étaient inversées, ce qui suggère d'une part que la transmission était dépendante de la direction du flux d'air dans la pièce d'essai et que d'autre part, cette transmission était due à des particules suffisamment petites pour être entraînées par le flux d'air. Il est à noter que les caractéristiques de ce flux d'air ne sont pas indiquées par les auteurs.

D'autres études expérimentales visant à comparer les caractéristiques de la maladie induite par instillation nasale et par inhalation d'aérosols, ont été réalisées chez diverses espèces animales : souris (Francova, 1975 ; Wells et Henle, 1941), singe écureuil (Snyder et *al.*, 1986) et poney (Mumford et *al.*, 1990). Bien que les résultats observés doivent être

considérés avec circonspection du fait de l'utilisation de souches virales et de conditions expérimentales très différentes, ces deux modes d'infection ont permis de reproduire des lésions comparables à celle observées chez l'homme et ont montré que l'exposition par inhalation d'aérosols a conduit à des signes cliniques plus sévères que l'instillation nasale.

La majorité des études expérimentales montre que l'infection par le virus *Influenza* peut être transmise par aérosols, Le risque de transmission du virus est réduit par l'augmentation de la ventilation ou l'inversion du sens de la ventilation. De plus, cette transmission est possible lorsque des animaux exposés sont placés soit au-dessus des animaux infectés, soit dans des conduits de ventilation sinueux (conditions inadaptées à la transmission par gouttelettes).

Toutefois, la notion de transmission aérienne à grande distance *via* la ventilation, par exemple dans différentes salles d'un bâtiment, n'a pas été explorée, dans la mesure où la distance entre les animaux a toujours été inférieure à 2,5 mètres.

Comme chez l'Homme, les doses infectieuses sont plus faibles par aérosol, ce qui rend plausible l'hypothèse d'une transmission à distance.

### 3.6 Conclusions sur les modes de transmission des virus *Influenza A*

L'ensemble de ces données montre le rôle évident de la proximité dans la transmission du virus grippal, qu'il s'agisse de contact direct ou indirect, de transmission par gouttelettes ou par aérosol de proximité.

La principale question est celle de la transmission par aérosol au-delà de 2 à 3 m au sein d'un bâtiment, notamment *via* les systèmes de ventilation.

L'émission d'aérosols par les personnes contaminées est avérée et les études en laboratoire montrent que les conditions de température et d'humidité régnant dans un bâtiment autorisent la survie du virus de la grippe pendant plusieurs heures. Les données sur le comportement des virus dans un aérosol hors laboratoire sont en revanche très pauvres et les études expérimentales humaines non conclusives.. Les études animales montrent la possibilité de transmission par aérosol, mais n'ont jamais évalué de distance supérieure à 2,5 mètres. Enfin, deux études épidémiologiques évoquent la possibilité de transmission à distance par aérosol, dont une avec implication du système de traitement de l'air.

Même s'il apparaît que la transmission du virus grippal est essentiellement fonction de la proximité, n'ayant aucune connaissance sur la virulence possible d'un futur virus *Influenza* pandémique, la possibilité de transmission à distance par aérosol ne peut être exclue.

Toutefois, il est à noter que cette conclusion est quelque peu différente d'une analyse récemment publiée, concluant que le risque de transmission à distance *via* les systèmes de ventilation ou de climatisation semble peu probable (Ezratty et Squinazi, 2008).

Le rapport du Conseil des académies canadiennes publié en 2007, conclue quant à lui, que le risque de transmission à distance du virus grippal ne peut être complètement éliminé. Roy et Milton (2004) n'excluent pas non plus une possible transmission à distance.

## 4 Description des systèmes d'aération et de ventilation dans les bâtiments

La ventilation est un procédé par lequel l'air intérieur est renouvelé par admission d'air neuf et par évacuation d'air vicié, à l'aide de moyens naturels ou mécaniques, dans le but d'assurer le confort thermique et la santé des occupants. Le terme d'aération est employé lorsque l'air d'un local est renouvelé sans faire appel à un dispositif spécifique de ventilation, c'est-à-dire uniquement par ouverture des fenêtres et par les défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe dans le bâtiment.

### 4.1 Principes de ventilation

Deux grands principes de ventilation basés sur le cheminement de l'air à l'intérieur du bâtiment peuvent être distingués : la ventilation par pièces séparées et la ventilation par balayage.

#### 4.1.1 Ventilation par pièces séparées

Avec le principe de ventilation par pièces séparées, l'entrée puis l'évacuation de l'air s'effectuent dans la même pièce, soit par un seul orifice de grande dimension (fenêtre), soit par deux orifices (2 orifices en façade ou 1 orifice en façade et un conduit à tirage naturel), soit par un système mécanique assurant dans la même pièce l'amenée d'air neuf et l'extraction d'air pollué (systèmes double flux par pièces, équipés ou non d'un échangeur de chaleur). C'est le principe de ventilation des logements construits avant les années 1970.

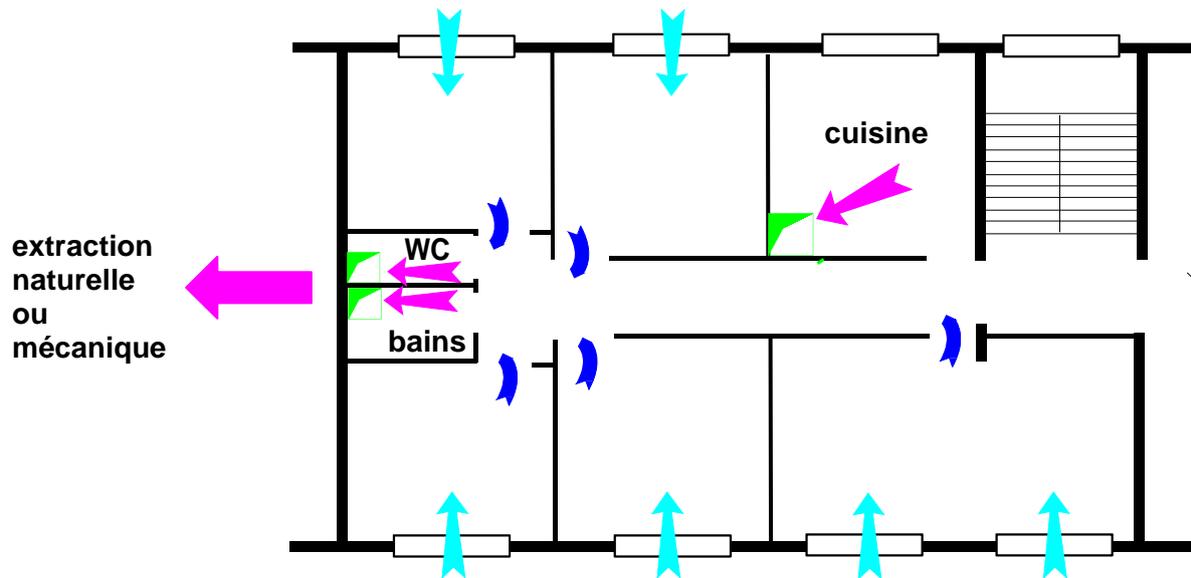
#### 4.1.2 Ventilation générale par balayage

Le principe de ventilation générale par balayage a été initialement instauré dans les bâtiments d'habitation par la réglementation de 1969<sup>7</sup>. Il consiste à introduire naturellement ou mécaniquement de l'air neuf dans les pièces principales du logement (séjour, chambres) et à extraire naturellement ou mécaniquement l'air vicié dans les pièces de service (cuisine, salle de bains, WC). Ainsi, ce principe de ventilation permet d'assurer le transfert de l'air des pièces les moins polluées vers les pièces les plus polluées.<sup>8</sup> La Figure 1 illustre pour un logement le principe du balayage.

---

7 Arrêté du 22 octobre 1969 (JO du 30 octobre 1969) : Aération des logements.

8 Dans les années 70, il était communément admis que les pièces humides étaient plus polluées que les pièces de vie. Cette notion n'est pas forcément adaptée à notre problématique (émissions d'origine humaine).



**Figure 1 : Principe de la ventilation générale par balayage**

L'air neuf pénètre par des entrées d'air situées par exemple, en traversée haute de fenêtre, en coffre de volets roulants, ou en maçonnerie. Il transite dans le logement à travers des passages de transit ménagés dans les portes. L'air vicié est extrait dans les pièces de service par des bouches d'extraction, puis est rejeté vers l'extérieur au moyen de conduits collectifs ou individuels. Ce principe de ventilation utilise le même air pour évacuer les pollutions des pièces principales, puis des pièces techniques. Un tel système, en limitant les débits d'air, permet d'économiser l'énergie nécessaire au chauffage de l'air de ventilation. En revanche, compte-tenu des faibles différences de pression entre les pièces des logements, ce principe peut facilement être mis en défaut (Koffi et *al.*, 2007), car il est très sensible à des paramètres physiques tel que le tirage thermique et à des paramètres liés au comportement humain, comme l'ouverture des portes.

Ce principe de balayage peut également être appliqué à des bâtiments autres que d'habitation. Dans ce cas, le cheminement de l'air se fait de la manière suivante : l'air neuf provenant de l'extérieur est introduit naturellement ou mécaniquement dans les « locaux d'entrée », puis est extrait dans les « locaux intermédiaires » ou les « locaux de sortie ».

Les « locaux d'entrée » sont des locaux où l'on séjourne longtemps. Ils ne sont le lieu que d'une pollution humaine courante (par exemple, locaux où l'on travaille).

Les « locaux intermédiaires » sont des locaux où l'on ne fait que passer et où l'on pollue très peu tels que les circulations (couloirs, entrées, escaliers, etc.), leurs locaux annexes (vestiaires, etc.), les locaux de rangements (réserves, dépôts, archives, etc.).

Les « locaux de sortie » sont des locaux dont la pollution est telle qu'elle interdit de se servir de l'air sortant pour ventiler d'autres locaux : il s'agit des toilettes, des cuisines, des buanderies, etc.

### 4.1.3 Ventilation par balayage partiel

La ventilation par balayage partiel est un principe hybride entre la ventilation générale et la ventilation par pièces séparées. Les entrées d'air sont situées dans des pièces différentes de celles où a lieu l'évacuation de l'air. Dans ce cas, le cheminement de l'air n'est pas réellement maîtrisé (entrées d'air dans les pièces principales, extraction en cuisine, salle de bains et cabinets d'aisance, ventilés séparément par ouvrants).

## 4.2 Typologies des principaux systèmes de ventilation

Il existe différents moyens et dispositifs pour ventiler un bâtiment. Les deux principales familles sont la ventilation naturelle et la ventilation mécanique.

### 4.2.1 Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est assurée par l'écart de température existant entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment (thermoconvection), ainsi que par le vent. Elle se fait sans assistance mécanique, c'est-à-dire sans faire appel à des ventilateurs. Deux possibilités sont à considérer suivant que l'on fait appel ou non à un dispositif spécifique de ventilation.

#### 4.2.1.1 Aération par ouvrants extérieurs

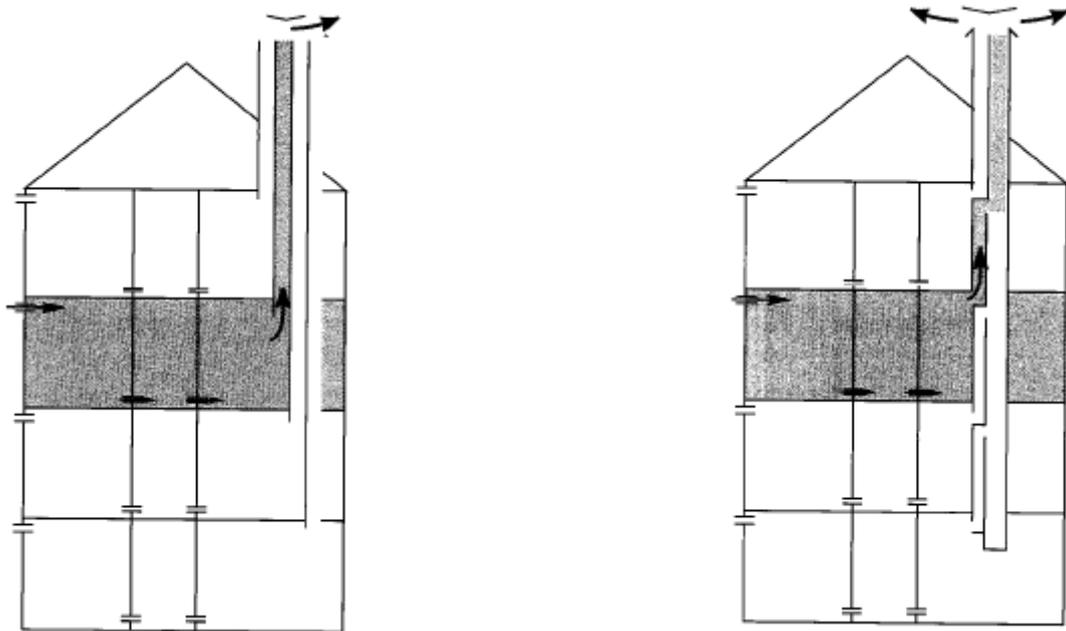
Si le bâtiment ne comporte aucun système de ventilation, son aération est assurée directement par les ouvrants donnant sur l'extérieur (portes, fenêtres ou défauts d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment). Ce mode d'aération est très présent dans le parc de bâtiments en France. En effet, une étude de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) a montré que 21,4% du parc de logements français est dépourvu de dispositif de ventilation et que ce mode d'aération par ouvrant a été le plus utilisé jusque dans les années 1950. Les logements non équipés de dispositif spécifique de ventilation représente 16,6% du parc de logements collectifs. Par ailleurs, on peut estimer la part de bâtiments du secteur tertiaire aérés uniquement par ouverture des fenêtres à 34% (Kirchner et *al.*, 2008).

Un tel mode d'aération ne peut être qu'intermittent et ne permet pas de contrôler le débit d'air renouvelé, donc la qualité de l'air. Il génère en hiver des gênes dues aux courants d'air froid. Ce procédé étant fortement consommateur d'énergie, les utilisateurs ont tendance à maintenir les fenêtres fermées ce qui peut nuire à la qualité de l'air.

#### 4.2.1.2 Ventilation par conduits à tirage naturel

L'évacuation de l'air vicié s'effectue par conduits à tirage naturel (Figure 2) : ces conduits assurent la sortie de l'air vicié. Ils sont situés dans les pièces de services (cuisine, salle de bain, toilettes) et fonctionnent par tirage naturel. La circulation de l'air est induite par le tirage thermique dû aux différences de températures entre l'intérieur du bâtiment et l'air extérieur. La force du vent sur l'enveloppe du bâtiment et notamment sur les débouchés des conduits en toiture influence le renouvellement d'air. Dans les logements récents, les pièces principales (pièces à vivre) sont équipées d'un orifice d'entrée d'air neuf de type autoréglable (ajustement de la section de passage de l'air en fonction du vent). Les sorties d'air sont fixes ou réglables manuellement. Ce système est rencontré dans l'habitat individuel ou collectif.

C'est le système le plus rencontré dans l'habitat collectif soit 41,2% du parc (Kirchner et al., 2008). En habitat collectif, les conduits d'évacuation à tirage naturel peuvent être soit individuels, c'est-à-dire ne desservant qu'une pièce de service, soit collectifs c'est-à-dire desservant plusieurs étages. Un conduit collectif doit comporter un conduit collecteur et des raccordements individuels de hauteur d'étage, chacun de ces derniers ne desservant qu'une pièce (conduit shunt). Le renouvellement de l'air d'un logement ventilé naturellement varie en fonction des conditions climatiques : lorsqu'il n'y a pas de vent, ni de différence de température, ce système ne fonctionne pas et le renouvellement de l'air n'est pas assuré.



Conduits individuels

Conduit collectif type shunt

Figure 2 : Conduits à tirage naturels

Source : ventilation des bâtiments, réhabilitation dans l'habitat collectif, CSTB

#### 4.2.2 Ventilation mécanique contrôlée

La ventilation mécanique contrôlée (VMC) est assurée par un dispositif comprenant notamment un groupe motoventilateur qui permet, soit uniquement l'extraction de l'air vicié (simple flux), soit à la fois l'insufflation d'air neuf et l'extraction de l'air vicié (double flux).

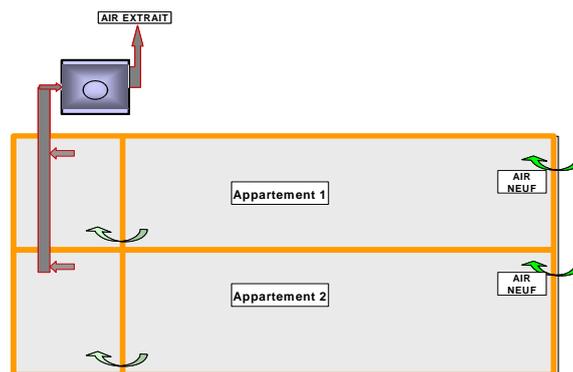
##### 4.2.2.1 Ventilation mécanique contrôlée simple flux

Ce système se rencontre tant dans l'habitat individuel et collectif, que dans le secteur tertiaire. La VMC est le système le plus fréquent dans l'habitat individuel (35,7% du parc). Elle est présente dans 34% des logements collectifs. Treize pour cent du parc de bâtiments tertiaires est équipé de VMC autoréglable. Dix pour cent de ce parc est équipé de ventilation

mécanique ponctuelle (Kirchner et *al.*, 2008). L'air vicié est refoulé vers l'extérieur par le ventilateur, par l'intermédiaire d'un conduit général débouchant en toiture. Ce type de ventilation met les pièces en légère dépression par rapport à la pression extérieure (Figure 3).

L'entrée d'air neuf se fait de façon naturelle. Les bouches d'entrée d'air sont situées dans les pièces principales et sont couramment de type autoréglable. Les bouches d'extraction d'air vicié sont situées quant à elles dans les pièces de service. Elles peuvent être autoréglables, hygroréglables ou fixes. Les bouches autoréglables permettent d'extraire un débit d'air à peu près constant, quelle que soit la dépression en aval de la bouche. Grâce à un capteur d'humidité, la ventilation hygroréglable module automatiquement les débits d'air extrait en fonction du taux d'humidité de l'air intérieur du logement, par ajustement de la section de passage d'air. Les systèmes de ventilation hygroréglables font l'objet d'un avis technique délivré par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

Le débit de pointe en cuisine est généralement obtenu soit par une commande manuelle agissant sur l'ouverture d'un volet de la bouche d'extraction, soit, en maison individuelle, par une commande électrique agissant sur la vitesse de rotation du ventilateur. En habitat individuel, le groupe d'extraction est généralement placé dans les combles. En habitat collectif, l'installation comprend généralement plusieurs conduits collecteurs verticaux reliés entre eux, en toiture de l'immeuble, par un réseau de conduits horizontaux de collecte, ce dernier aboutissant à l'extracteur.



**Figure 3 : Principe de la ventilation mécanique contrôlée simple flux**

#### 4.2.2.2 Ventilation mécanique contrôlée double flux

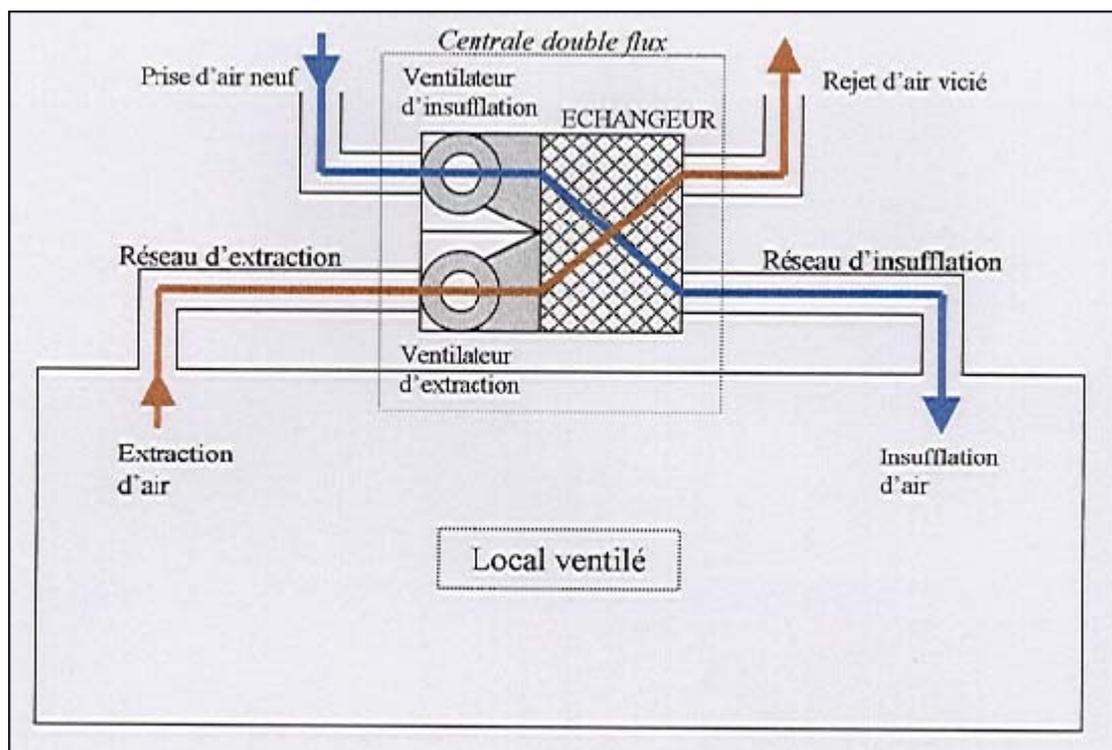
La VMC double flux est un système de ventilation mécanique centralisé, par insufflation et extraction d'air, comprenant un groupe de ventilation et de récupération de chaleur, un réseau d'insufflation d'air neuf, un réseau d'extraction d'air vicié (Figure 4). L'air neuf, capté par une prise d'air extérieur située en dehors de toute zone de pollution, passe à travers l'échangeur de chaleur avant d'être insufflé dans les pièces principales par l'intermédiaire d'un réseau de conduits. L'air vicié est extrait des pièces de service par le ventilateur d'extraction, puis refoulé dans le caisson comprenant l'échangeur avant d'être rejeté à l'extérieur du logement.

Le système VMC double flux nécessite la mise en place de deux réseaux d'air, l'un pour l'insufflation d'air, l'autre pour la reprise d'air, avec un ventilateur pour chaque réseau. Un

échangeur de chaleur est généralement installé entre les réseaux de soufflage et d'extraction de façon à préchauffer l'air insufflé par les calories récupérées sur l'air vicié extrait. Ainsi, outre le gain énergétique, le confort thermique est amélioré car l'air est insufflé à une température supérieure à la température extérieure. La prise d'air neuf est généralement équipée d'un filtre permettant d'éliminer les grosses particules (filtre de type gravimétrique).

Le système de VMC double flux est généralement équilibré, c'est-à-dire que la quantité d'air insufflé est sensiblement égale à la quantité extraite. Dans ce cas, le local est à différence de pression nulle. Sinon, le local peut être en légère surpression ou légère dépression.

Le système double flux est réservé aux installations de taille importante. Il se décline en plusieurs systèmes plus ou moins complexes, avec ou sans traitement d'air (chauffage ou rafraîchissement selon la saison). Il est surtout utilisé dans les bâtiments tertiaires. En effet, dans l'habitat, il ne représente que 0,82% du parc des logements individuels et 0,25% du parc des logements collectifs. Neuf pour cent des bâtiments tertiaires sont équipés d'une VMC double flux et 34% d'une centrale de traitement d'air intégrant la fonction ventilation (Kirchner et *al.*, 2008). (cf. paragraphe suivant)



**Figure 4 : Principe d'une ventilation double flux avec échangeur récupérateur de chaleur**

Source : ADEME

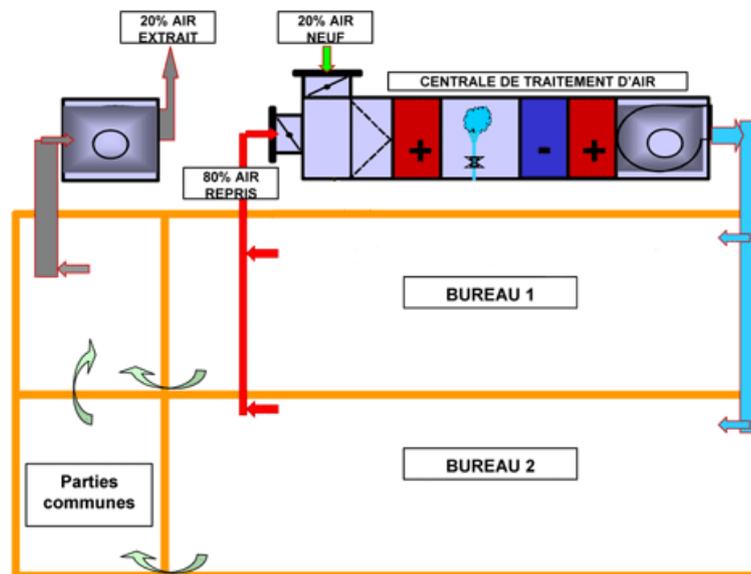
#### 4.2.3 Centrale de traitement d'air avec recyclage d'air

Dans ce système, une unité de traitement d'air prépare, transporte et distribue l'air directement dans les pièces, *via* un réseau de distribution au sein du bâtiment (Figure 5).

Cette unité de traitement d'air assure ainsi deux fonctions : le renouvellement de l'air et sa climatisation. Elle est communément appelée centrale de traitement d'air (CTA).

L'unité centrale comporte généralement un filtre à poussières, (filtre gravimétrique, cf. chapitre 8), un système de chauffage ou de refroidissement, un humidificateur et un ventilateur. Un mélange d'air neuf (environ 20%) et d'air repris en provenance des locaux (environ 80%) est filtré, rafraîchi ou réchauffé, humidifié en mode hiver, puis envoyé au moyen d'un ventilateur dans les pièces du bâtiment. La CTA peut être située sur le toit du bâtiment ou dans un local technique annexe au bâtiment.

Ce système assure un brassage d'air de 6 à 8 vol/heure. Il prend en charge le renouvellement de l'air dans le bâtiment et assure le confort thermique et hygrométrique des occupants, par l'intermédiaire de l'air, jouant le rôle de fluide calo ou frigo porteur, d'où le nom également donné de système « tout air ».



**Figure 5 : Principe d'une CTA avec recyclage d'air**

#### 4.2.3.1 Unités de toiture (roof-top)

Ces dispositifs sont généralement utilisés dans les hypermarchés. Dans ces bâtiments où la mise en œuvre d'un climat artificiel est nécessaire pour le confort des occupants, la ventilation, le chauffage ou le refroidissement s'effectue en général au moyen d'unités de toiture ou roof-tops. Ces unités sont apparentées aux CTA avec recyclage d'air et soufflent un mélange d'air neuf (environ 20%) et d'air repris (environ 80 %) par un réseau de gaines et de diffuseurs et reprennent l'air directement sous la toiture. Chaque unité de toiture dessert une zone d'environ 400 m<sup>2</sup> de surface. Il est à noter toutefois que ce zonage n'est pas bien réalisé. En effet, une grande homogénéité des températures peut être observée, signifiant l'existence de transferts d'air. Ainsi, chaque unité pourrait contribuer au chauffage ou au refroidissement de l'ensemble de l'aire de vente. Par ailleurs, certaines zones ne seraient pas suffisamment ventilées. Les roof-tops sont dimensionnés pour apporter un taux de renouvellement d'air de 18m<sup>3</sup>/h/personne.

#### 4.2.4 Centrale de traitement de l'air sans recyclage

Ces systèmes sont analogues au précédent, mais sans recyclage d'air (Figure 6). Dans la majorité des cas, pour éviter des coûts énergétiques excessifs, les débits d'air sont limités au renouvellement d'air, soit environ 1,5 vol/h. Le confort thermique est assuré par des ventilo-convecteurs fonctionnant à partir d'une pompe à chaleur qui alimente, en eau réchauffée ou rafraîchie selon la saison, un réseau auquel ils sont raccordés. Un thermostat d'ambiance permet de régler précisément l'appareil selon la température souhaitée dans chacune des pièces. Le passage de la fonction « chauffage » à la fonction « climatisation » se fait grâce à un simple bouton.

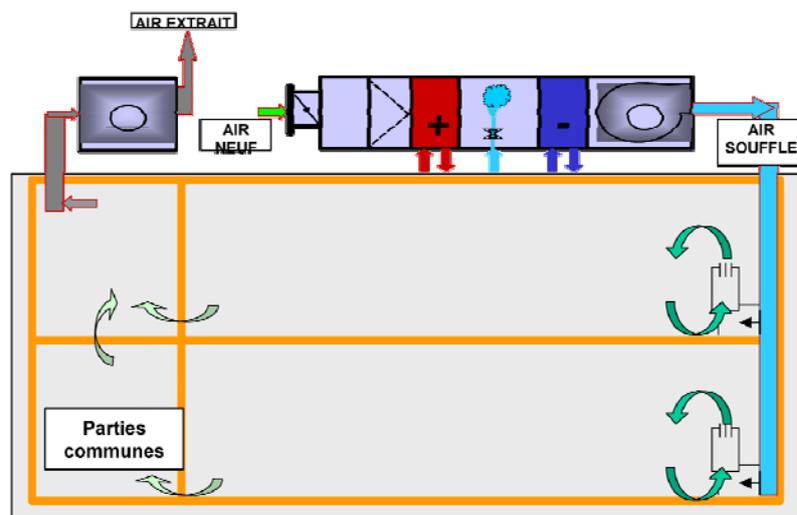


Figure 6 : Principe d'une CTA sans recyclage

#### 4.3 État des lieux

La réalité de terrain montre que les dispositifs rencontrés ne correspondent pas toujours à la typologie décrite au paragraphe précédent. A titre d'exemple, les immeubles collectifs réhabilités sont souvent équipés de ventilation hybride (conduit à tirage naturel avec assistance mécanique par ventilateur).

Par ailleurs, comme le montrent les résultats de l'étude de terrain de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) (Kirchner, et *al.*, 2008) et de l'étude expérimentale menée par le CSTB (cf. encadré chapitre 7.2.3) :

- les débits mesurés ne sont pas toujours ceux attendus ;
- le cheminement réel de l'air dans le bâtiment n'est pas toujours conforme aux prévisions.

## 5 Évaluation du risque de transmission à distance du virus *Influenza* pandémique

Les caractéristiques d'un virus grippal pandémique n'étant pas connues au moment de la rédaction de ce rapport, le groupe de travail a abordé la question à partir des données disponibles sur les virus *Influenza* actuellement en circulation et plus généralement, à partir des connaissances sur les virus transmissibles par voie aérienne.

### 5.1 Modes de transmission des virus *Influenza A*

L'analyse des études épidémiologiques et expérimentales disponibles à ce jour, évoquent la possibilité de transmission des VIA selon quatre modes :

- *via* la projection de gouttelettes, émises par la parole, la toux ou les éternuements de sujets sources vers des sujets contacts géographiquement proches ;
- *via* un contact physique entre un sujet source en phase d'incubation ou infecté et un sujet contact ;
- *via* les surfaces ou les objets contaminés, par contact avec les mains qui sont ensuite portées aux muqueuses respiratoires ;
- *via* les aérosols émis par des sujets sources contaminés vers des sujets contacts dans une même pièce.

Toutefois, si la proximité entre un individu infecté et un individu contact semble se détacher comme une condition majeure pour la transmission des virus *Influenza*, la possibilité d'une contamination à distance par du virus aérosolisé ne peut-être exclue, ni celle en particulier d'une contamination à distance *via* les systèmes de ventilation. Cette dernière éventualité impliquerait l'émission de particules infectantes par un individu, la contamination du système de ventilation, la survie des virus dans ce système, leur transport à travers les pièces d'un bâtiment, et enfin leur inhalation par un individu contact.

### 5.2 Transport des particules virales à l'intérieur d'un bâtiment *via* les systèmes de ventilation

#### 5.2.1 Ventilation naturelle ou mécanique

Compte tenu de l'analyse des données de la littérature, la ventilation naturelle ou mécanique interviendrait peu sur la sédimentation des gouttelettes. En revanche, elle jouerait un rôle ambivalent dans le transport des aérosols contaminés :

- un rôle bénéfique en diluant la quantité de particules virales aérosolisées dans la pièce, d'où une diminution du risque de transmission de proximité entre des individus,

- un rôle délétère, en favorisant le transport des particules virales par le réseau aéraulique, ce qui pourrait augmenter le risque de transmission à distance.

Le dépôt et la remise en suspension des aérosols viraux peuvent être influencés par les conditions thermo-convectives et la ventilation. Ces phénomènes peuvent avoir des conséquences favorables ou défavorables sur le risque de transmission viral.

Les conditions de température et d'hygrométrie régnant généralement dans les bâtiments durant la période hivernale de morbidité grippale autorisent la conservation du pouvoir infectieux du virus, au moins partiellement, jusqu'à 24 heures.

### 5.2.2 Centrale de traitement de l'air

Dans une étude expérimentale du transport des aérosols dans un espace clos ventilé menée par le CSTB, une enceinte expérimentale simulant un bâtiment composé de deux bureaux (exposition et source) et d'un couloir a été créée. Un système de ventilation modulable (CTA avec ou sans recyclage d'air, absence de ventilation, absence d'apport d'air neuf) est intégré dans cette enceinte expérimentale. L'hygrométrie, la température et le débit d'air sont contrôlés dans cette enceinte.

Des aérosols bactériens de *S. epidermidis* de 0,7 µm de diamètre sont émis pendant 15 minutes par un mannequin dans le bureau « source ».

Lorsque le système est utilisé en mode recyclage d'air dans le bureau « exposition », les aérosols sont retrouvés à une concentration 1000 fois plus faible que la concentration de départ dans le bureau « source ». L'augmentation du taux de renouvellement d'air neuf permet de réduire encore significativement le niveau d'exposition de l'occupant, avec un abattement de l'ordre de 80% lorsque l'apport d'air neuf passe de 0,9 à 1,6 vol/h. Au-delà de cette dernière valeur, aucun gain supplémentaire, en termes de réduction du niveau d'exposition, n'est observé, ceci en raison de la reprise d'air vicié, inhérent à ce mode de ventilation. Concernant le temps de ½ vie du polluant particulaire, les essais ont montré qu'il décroît à mesure que le renouvellement d'air augmente, passant de 25 à 15 minutes pour respectivement des taux de 1,6 et 2,8 vol/h.

De plus, il est montré que non seulement la concentration de ces aérosols dans le bureau « exposé » décroît au cours du temps, mais également qu'une humidité relative de 50% dans le bureau favorise la survie des aérosols bactériens.

Dans un contexte de ventilation dégradée, c'est-à-dire hors ventilation et sans apport d'air neuf, le niveau d'exposition demeure semblable à celui observé en CTA avec recyclage.

Pour conclure, l'exposition d'un occupant à des aérosols bactériens est différente selon le mode de ventilation envisagé.

- **la ventilation en tout air neuf constitue le mode de ventilation qui limite le plus l'exposition aux aérosols ;**
- **la CTA avec recyclage d'air multiplie par 2.5 le niveau d'exposition aux aérosols par rapport à la ventilation en tout air neuf ;**
- **en l'absence de ventilation, l'exposition aux aérosols est semblable à celle observée en CTA avec recyclage.**

### 5.3 Évaluation du risque de transmission du virus *Influenza* pandémique par les systèmes de ventilation

Il est important de noter que les systèmes de ventilation, tels que présentés dans le chapitre 4, ne présentent pas tous le même potentiel de risque, vis à vis du transport des particules virales. S'il est difficile d'évaluer le risque de transport du virus pour chacun de ces systèmes, ceux utilisant le principe du recyclage d'air sont plus à même de favoriser la propagation du virus, que les systèmes sans recyclage d'air.

Les paramètres clés de l'évaluation du risque sont la quantité de particules virales émises, la dose infectante et la probabilité d'y être exposé. Or, aucun de ces paramètres ne peut être actuellement quantifié s'agissant d'un futur virus pandémique.

L'examen des situations d'expositions potentielles au virus pandémique dans 3 types de bâtiments que le groupe de travail considère comme représentatifs des principales circonstances d'exposition permet de comprendre la difficulté de réaliser une évaluation de risque, même qualitative.

#### 5.3.1 Hypermarchés

Les hypermarchés se caractérisent par un gros volume et un très important brassage de population. Dans l'hypothèse où en situation de pandémie, il n'y a pas de restriction d'accès vis-à-vis des personnes infectées ou malades, les émissions virales y seront certaines.

Le risque de contamination de proximité est réel dans les zones de concentration de personnes (files d'attentes) et notamment pour le personnel en contact avec le public (postes de caisse).

Les mouvements de l'air entraînés par les systèmes de ventilation (roof top, CTA) ont pour effet de diluer les particules virales aérosolisées et donc de diminuer leur concentration à proximité immédiate de l'émetteur, mais également de favoriser le transport et la propagation potentielle du virus à l'ensemble du magasin, du fait des transferts d'air horizontaux et du recyclage de l'air.

En théorie, la suppression du recyclage d'air, donc le passage en tout air neuf, permettrait de diminuer la concentration de particules virales au sein de l'hypermarché. Cette solution présente cependant plusieurs inconvénients, réels ou potentiels. En hiver, la température de soufflage pourrait être abaissée du fait d'une puissance insuffisante des batteries servant à réchauffer l'air neuf, ce qui diminuerait le confort des occupants du bâtiment. Si la température ou l'humidité devaient chuter fortement, le groupe de travail ne peut se prononcer sur l'efficacité de l'arrêt du recyclage de l'air, du fait de l'augmentation de la transmission virale entre 5 et 20°C, suggérées par les études de Lowen, (2006) chez l'animal et de Shaman et Kohn, (2009).

En cas de suppression du recyclage d'air, les conduits d'évacuation vers l'extérieur n'ayant pas la capacité d'évacuer un volume d'air vicié plus important, le trop plein d'air injecté s'évacuera par les portes et les défauts d'étanchéité de l'enveloppe de l'hypermarché vers l'extérieur. Dans le cas où l'hypermarché est intégré à une galerie marchande, le passage du système en tout air neuf implique un risque de dispersion du virus dans la galerie, du fait de l'évacuation de l'air dans la galerie. En général, les galeries sont équipées de CTA sans recyclage. Chaque magasin à l'intérieur de la galerie peut avoir un système de ventilation

indépendant et différent (les plus volumineux, comme les grands magasins, ont une CTA alors que les petits magasins n'ont rien). Il est quasiment impossible de connaître avec précision le risque global inhérent à cette situation.

Pour les supermarchés situés en dehors des galeries marchandes et certains établissements recevant du public équipés de VMC simple flux, le bâtiment est en dépression et l'air neuf arrive par les ouvrants ou les défauts d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment. Ce système de ventilation diminue donc le risque de transmission grâce à la dilution des particules infectieuses. Le groupe de travail recommande donc de le faire fonctionner. Dans le cas de la présence d'une CTA avec recyclage d'air, le risque de favoriser une contamination par dispersion existe. Le groupe de travail recommande le passage en tout air neuf si possible, et si le débit de ventilation ne diminue pas pour autant. En l'absence de tout système de ventilation, les portes et/ou fenêtres doivent être maintenues ouvertes afin de favoriser la ventilation naturelle, dans la mesure du possible.

### 5.3.2 Les immeubles de bureaux

Dans les immeubles de bureaux, le risque d'émission de particules virales semble moindre que dans les centres commerciaux, en raison d'une plus faible concentration humaine. Néanmoins les personnes sont exposées pendant des périodes plus longues que les clients des centres commerciaux. Par ailleurs, s'il est recommandé en phase pandémique de respecter une distance de « sécurité » supérieure à 2 mètres, nous avons vu que le risque de transmission par aérosol est potentiellement présent au-delà de cette distance, sans parler du transport des particules virales par les systèmes de ventilation.

#### 5.3.2.1 Absence de ventilation mécanique

Lorsqu'il n'existe pas de système VMC, le groupe de travail recommande d'ouvrir les fenêtres et d'éviter les regroupements de personnes. Pour augmenter la dilution du virus et limiter sa propagation, le groupe de travail recommande d'une manière générale d'associer l'ouverture des fenêtres et la fermeture des portes.

#### 5.3.2.2 Ventilation mécanique contrôlée simple flux

Le système VMC simple flux conduit à minimiser le risque de transmission de proximité en limitant le temps de séjour des aérosols infectieux. Lorsque la reprise de l'air est commune à un grand nombre de bureaux, soit dans les toilettes, soit dans une autre partie commune, ces espaces peuvent en théorie être le lieu de passage de l'ensemble des aérosols infectieux. Néanmoins, dans ce cas on se situe déjà à une certaine distance (cas général) du lieu d'émission, d'où un effet de dilution des particules virales. Une ouverture des fenêtres quand elle est possible pourrait limiter l'exposition des occupants du bureau aux aérosols.

#### 5.3.2.3 Ventilation mécanique contrôlée double flux

Dans le cas de bureaux ventilés par une VMC double flux, ce système diminue le risque de transmission de proximité et n'entraîne pas de dispersion virale dans d'autres lieux (sauf sur le trajet de l'air dans les parties communes vers la bouche de reprise d'air). Il faut veiller à ce que la prise d'air neuf ne se situe pas sous le vent de la cheminée d'extraction, ce qui est

valable dans toutes les situations examinées ici. Le groupe de travail ne peut se prononcer sur la possibilité technique et l'opportunité, en termes de diminution des risques, d'une augmentation des débits d'air.

Si les fenêtres des bureaux peuvent être ouvertes, le renouvellement d'air sera amélioré. Néanmoins, avec une VMC double flux, le bâtiment étant en légère surpression, les cheminements de l'air sont plus aléatoires, surtout en cas d'ouverture des fenêtres. Le groupe recommande toutefois cette ouverture régulière des fenêtres, en y associant une fermeture des portes.

#### 5.3.2.4 Système de traitement d'air avec recyclage

Un système de traitement d'air avec recyclage diminue le risque de transmission de proximité mais entraîne potentiellement une dispersion des particules virales émises dans un bureau à l'ensemble des autres bureaux, après passage dans la centrale de traitement d'air. Une ouverture des fenêtres lorsque cela est possible permettrait de limiter l'exposition des occupants des bureaux aux aérosols.

Si le recyclage est supprimé, il se peut que le débit d'air neuf ne puisse être augmenté. Il y aura donc une diminution du débit d'air passant dans les pièces. Ce débit d'air ne sera pas suffisant pour balayer toute la pièce et des différences importantes de températures seront ressenties par les occupants. De plus, le risque de transmission de proximité pourrait augmenter, notamment dans le cas des bureaux paysagés et sans possibilité d'ouvrir les fenêtres. Dans ce cas, il est difficile de recommander le passage en tout air neuf.

En revanche, si le système de ventilation permet de maintenir le même débit, avec uniquement de l'air neuf, l'arrêt du recyclage d'air permettrait de diminuer le risque d'exposition des occupants aux aérosols.

### 5.3.3 L'habitat collectif

Dans l'habitat ancien où le renouvellement de l'air se fait généralement par ventilation naturelle, le groupe de travail rappelle l'importance de l'ouverture des fenêtres pour une meilleure qualité de l'air dans les logements. L'impact vis-à-vis du risque de transmission du virus *Influenza* pandémique est aussi positif. Le groupe note la possibilité de refoulements d'air avec les conduits shunts.

Dans le cas de la VMC simple flux, le système favorise l'évacuation des aérosols infectieux et a donc une action de diminution du risque de transmission du virus pandémique.

Le système VMC double flux diminue le risque de transmission du virus pandémique, par diminution du risque de proximité.

Le groupe remarque par ailleurs que chez les particuliers, les orifices d'évacuation ou de prise d'air neuf sont parfois obstrués. Ceci peut entraîner un déséquilibre dans le cheminement de l'air. Ainsi, de l'air en provenance d'un appartement dans lequel l'orifice d'évacuation est bouché peut migrer vers un appartement voisin. Il est recommandé, comme dans le cas des immeubles de bureau, de ne pas obstruer ces orifices.

## 6 Recommandations du groupe de travail

Les recommandations mentionnées ci-dessous peuvent aider les chefs d'établissement durant la préparation du plan de continuité de leurs entreprises, tel que préconisé par le plan national « pandémie grippale ». Les recommandations rédigées ci-dessous ne sont pas exhaustives.

### 6.1 Dans le cadre de la préparation à une pandémie grippale

#### 6.1.1 Mesures relatives aux systèmes de ventilation

Conformément aux dispositions réglementaires en vigueur (annexe 2), les gestionnaires des bâtiments doivent :

- vérifier qu'ils disposent d'une connaissance précise des installations de ventilation et de distribution d'air dans leurs bâtiments ;
- vérifier qu'ils disposent d'une bonne connaissance du fonctionnement et des limites d'utilisation des systèmes de ventilation ;
- veiller à l'entretien régulier des installations de ventilation ;
- vérifier les performances en œuvre (mesure des débits), des installations et remédier à tout éventuel dysfonctionnement ;
- vérifier la qualité du renouvellement d'air dans les locaux (bilans des flux aérauliques, ceux-ci dépendant non seulement du système de traitement et de distribution d'air, mais aussi de la configuration du bâtiment).

En outre, il convient de tester la faisabilité d'une modification du fonctionnement des systèmes de ventilation (possibilité de suppression du recyclage avec maintien des conditions de température et humidité).

#### 6.1.2 Recommandations pour les occupants de tout type de bâtiment

Le groupe de travail recommande dans le cadre d'une préparation à la pandémie, que le public soit informé des recommandations de bonnes pratiques pour la ventilation des locaux d'habitation (par exemple, ne pas obturer les entrées d'air et les bouches d'extraction, etc.). Pour les locaux de travail, l'employeur informera les salariés des mesures qui seront mises en œuvre et des comportements individuels à adopter, en cas de pandémie.

### 6.2 En période pandémique

Comme mentionné dans le plan gouvernemental de prévention et de lutte « Pandémie grippale », la priorité en matière de santé publique, dès la période d'alerte pandémique sur le territoire français (niveau d'alerte 6), sera de freiner autant que possible la propagation du virus, afin de protéger la population en métropole et en outre-mer, tout en assurant la continuité de la vie sociale et économique du pays.

Ce plan prévoit une restriction des activités professionnelles non essentielles. Du fait d'un probable absentéisme élevé (maladie, difficultés de transport, etc.), les entreprises fonctionneront en mode dégradé.

Indépendamment des recommandations spécifiques aux questions soulevées par la saisine, le groupe de travail rappelle les recommandations relatives à l'organisation du travail pouvant être faites, afin de limiter les contacts et réduire le risque de transmission, par exemple :

- limiter le nombre de personnes présentes simultanément dans un même volume, dans la mesure où l'activité le permet (télétravail, horaires décalés, etc.) ;
- éviter les réunions et les rassemblements de personnes ;
- privilégier les bureaux individuels en répartissant les personnels présents ;
- favoriser la communication par courrier électronique, téléphone, audioconférence ou visioconférence ;
- gérer les files d'attente (caisse de magasins, guichets de poste, etc.).

En dépit de l'insuffisance de données sur les conséquences pathogéniques d'un futur virus *Influenza* pandémique, mais à partir des connaissances disponibles sur les maladies respiratoires proches, dont les gripes humaines saisonnières, les pandémies grippales précédentes et les maladies virales respiratoires, plusieurs recommandations peuvent être émises pour limiter le risque de propagation du futur virus pandémique grippal dans un bâtiment.

### 6.2.1 Mesures relatives aux systèmes de ventilation et conditions d'aération

Ces mesures doivent s'appliquer indépendamment de toutes considérations de confort thermique et d'économies d'énergie. Elles visent à favoriser la dilution des particules virales tout en limitant leur propagation.

- Pour les locaux disposant d'ouvrants extérieurs, quel que soit le mode de ventilation existant, assurer une aération régulière des locaux par ouverture de ces ouvrants, pour diminuer le risque de transmission de proximité. Dans la mesure du possible, la fermeture des portes de bureaux sera également associée à cette mesure ;
- Si cela est techniquement possible (sauf en cas d'impossibilité d'ouvrir les fenêtres et dans les bureaux paysagés), arrêter le recyclage de l'air ;
- Dans les appartements, calfeutrer la porte palière pour éviter les échanges d'air avec la cage d'escalier.

Concernant les systèmes d'épuration de l'air, bien que certains d'eux semblent tout à fait efficaces en laboratoire pour éliminer les particules virales de l'air, le groupe de travail ne peut conclure sur l'efficacité réelle de ces systèmes dans les bâtiments (se reporter au chapitre 8).

## 6.2.2 Mesures générales de protection sanitaire des personnes

En dépit des incertitudes sur le type de transmission (gouttelettes ou aérosols) et sur les facteurs influençant la conservation du pouvoir infectieux des virus *Influenza*, un certain nombre de mesures pourraient réduire les risques de contamination.

Le groupe de travail souhaite rappeler l'importance de certaines mesures pouvant limiter le transport aérien des virus dans un bâtiment et réduire l'exposition des individus.

- Le port d'un masque de type antiprojections (chirurgical) pour les sujets qui toussent ou qui présentent des signes d'infection respiratoire ;
- Le lavage régulier des mains, en particulier après s'être mouché ou avoir éternué ;
- Une bonne "hygiène respiratoire" : se couvrir le nez et la bouche lorsque l'on tousse ou que l'on éternue, utiliser des mouchoirs jetables et les jeter dans une poubelle après usage ;
- Une désinfection des surfaces souillées ;
- Le port d'un masque de type antiprojections (chirurgical) lors des déplacements dans les lieux publics, incluant les entreprises, dans les transports en commun ou à domicile en cas de contact avec un sujet malade dès lors qu'il y a suspicion ou possibilité de transmission interhumaine ;
- Le lavage régulier des mains à l'eau et au savon, ou à défaut avec une solution désinfectante hydro-alcoolique.

Globalement, il a été montré que les mesures mises en place à l'occasion de l'épidémie de SRAS à Hong-Kong en 2003, associant notamment la limitation des contacts sociaux, le port de masque antiprojections par la population, le lavage des mains, l'utilisation d'un mouchoir pour tousser ou éternuer, avaient entraîné une diminution de la transmission des virus transmissibles par voie respiratoire (Lo et *al.*, 2005). L'effet individuel de chacune de ces mesures ne peut toutefois être déduit de cette étude.

Plusieurs études ont montré un impact du lavage des mains sur la diminution de la transmission des virus respiratoires, mais l'impact sur la transmission du virus grippal n'a pas été particulièrement étudié. (Carabin et *al.*, 1999 ; Dyer et *al.*, 2000 ; Falsey et *al.*, 1999 ; Larson et *al.*, 2004 ; Luby et *al.*, 2005 ; Ponka et *al.*, 2004 ; Roberts et *al.*, 2000 ; Ryan et *al.*, 2001 ; Uhari et Mottonen, 1999 ; White et *al.*, 2003).

La désinfection des surfaces pouvant être souillées par des sécrétions respiratoires apparaît souhaitable, en dépit de l'absence de preuves indiscutables sur son efficacité pour limiter une éventuelle épidémie.

## 7 Capacités des laboratoires à procéder à des mesures de quantités de virus *Influenza* dans l'air

### 7.1 Aspects technologiques

La plupart des méthodes décrites pour l'identification des virus grippaux reposent sur le prélèvement d'échantillons cliniques humains. Les outils d'identification moléculaires étant les mêmes, l'identification des virus présents dans l'air est possible. Le processus comprend plusieurs étapes :

- prélèvement d'un échantillon d'air,
- traitement de l'échantillon pour obtenir un échantillon analysable,
- identification.

Les enjeux techniques sont la sensibilité et la spécificité de la détection. La sensibilité doit être reliée à la dose infectieuse par voie aérosol du virus. Les performances actuellement possibles d'un processus d'identification d'un bioaérosol permettent de détecter entre 0,1 et 1 micro-organisme par litre d'air (en fonction de la durée que l'on s'autorise pour faire l'analyse).

#### 7.1.1 Prélèvement d'échantillons d'air

Afin d'atteindre une bonne sensibilité (c'est-à-dire pour détecter de faibles concentrations de virus dans l'air), il est nécessaire d'échantillonner un volume d'air de plusieurs m<sup>3</sup>. Des appareils appelés biocollecteurs sont disponibles. Le marché est limité mais en croissance du fait des préoccupations environnementales, d'hygiène et de bio-défense.

Des différences existent entre les technologies de biocollecte. Certaines produisent un échantillon directement analysable (principalement liquide), d'autres nécessitent une étape intermédiaire (impaction sur filtre puis transfert des particules en phase liquide). Le rendement de biocollecte (c'est-à-dire le rapport entre le nombre de particules contenues dans l'échantillon analysable final et celui présent dans le volume d'air collecté) est variable. Il est à noter que ce rendement décroît avec la taille des particules de l'aérosol. Pour les technologies produisant directement un échantillon liquide, les particules sub-micrométriques sont plus difficiles à collecter que celle de 1 µm ou plus (pour lesquelles des rendements > 50% sont possibles). Les méthodes utilisant l'impaction sur filtre ont les meilleurs rendements de collecte, mais une étape de transfert des particules cibles du filtre vers une phase liquide est nécessaire. Cette dernière peut présenter des difficultés et un rendement médiocre.

Les appareils sont transportables. Les volumes d'air aspirés peuvent être de l'ordre du m<sup>3</sup> par minute. Certains appareils sont portatifs mais ont des rendements plus faibles (la sensibilité globale de la détection dépend de la puissance et du volume collecté). Le bruit est aussi une contrainte pour la plupart des appareils. Un fonctionnement continu semble difficile à proximité de personnes sans protection auditive.

### 7.1.2 Analyses biotechnologiques

Quelle que soit la technique de prélèvement utilisée, une fois un échantillon liquide obtenu, plusieurs techniques d'identification du virus cible sont possibles. Les principales sont les méthodes génétiques et immunologiques. Ces méthodes donnent un résultat en quelques dizaines de minutes ou quelques heures selon la sensibilité recherchée. La preuve formelle de la présence d'un virus infectieux requiert sa mise en culture (le résultat est obtenu en plusieurs jours).

Les techniques génétiques de type *Polymerase Chain Reaction* (PCR) sont les plus sensibles (détection de quelques micro-organismes dans l'analyte) et peuvent être spécifiques si les amorces et les sondes PCR sont bien choisies, y compris pour le sous-type H5N1 (Ng et al., 2006). Dans ce cas, l'identification d'un sous-type particulier de virus *Influenza* est assurée. Néanmoins, dans le cas de l'émergence d'un virus jusqu'alors inconnu, ceci implique de séquencer le génome avant de définir les réactifs spécifiques. Cette technique permet aussi de détecter de façon « générique » les virus *Influenza A* (Gall, 2008) toujours en utilisant des réactifs adaptés.

Les techniques immunologiques, basées sur l'utilisation d'anticorps reconnaissant la cible virale, sont les plus rapides. Cependant, elles ne sont pas les plus sensibles ni les plus spécifiques, même si des anticorps spécifiques d'un sous-type de virus *Influenza* peuvent être développés (dont H5) (Chen et al., 2008). En particulier, selon la disponibilité et la qualité des anticorps utilisés, elles pourraient confondre divers sous-types de virus *Influenza*. Cela reste acceptable voire souhaitable s'il s'agit de donner une première « alerte » pour un virus encore mal caractérisé. Dans ce cas, des analyses immunologiques couvrant un large spectre de virus *Influenza A* sont possibles (Drummond et al., 2008).

S'il s'agit d'un virus hautement infectieux, la manipulation d'échantillons contaminés pourrait nécessiter un laboratoire de haute sécurité avec une salle technique de niveau de confinement 3 selon l'arrêté du 16 juillet 2007, ce qui limiterait le nombre des acteurs possibles. Cependant, l'inactivation des échantillons est possible par des méthodes simples ne compromettant pas les futures analyses qui pourraient alors être réalisées dans des laboratoires de niveau de confinement 2. Une fraction de l'échantillon pourrait être conservée pour la confirmation et l'étude du caractère infectieux (par un laboratoire spécialisé et sécurisé) en cas d'analyse positive.

### 7.1.3 Surveillance de l'air : intérêts et limites

En l'état actuel des technologies commerciales, la surveillance en flux continu dans un but d'alerte en temps réel n'est pas possible. Des développements sont en cours pour coupler une collecte d'air à une analyse biologique en débit continu et donner une alerte sur la présence de tel ou tel micro-organisme.

En pratique, même s'il est techniquement possible d'effectuer des collectes d'air ponctuelles suivies d'analyses, les laboratoires effectuant ce type de prélèvement sont actuellement très peu nombreux.

Cette organisation nécessiterait le développement de réseaux :

- d'équipes spécialisées dans le prélèvement d'échantillons environnementaux, dont l'air ;

- de laboratoires pouvant réaliser une première analyse biotechnologique du moment que les réactifs *ad hoc* sont disponibles ;
- de laboratoires spécialisés ou de référence (français ou européens), qui ne pourraient être requis que pour la preuve formelle de la présence d'un virus effectivement infectieux. Ces laboratoires seraient en charge de l'élaboration des réactifs de détection.

En situation de pandémie, en l'état actuel des développements technologiques (biocollecte et analyses), il ne paraît cependant pas possible de réaliser ce type de prélèvement de manière généralisée.

En revanche, il paraît intéressant de développer cette approche dans un cadre de recherche, sur des installations pilotes, mais aussi plus généralement pour faire progresser les connaissances sur la transmission du virus grippal par aérosols.

En outre, il est possible d'envisager l'utilisation de ces techniques à des fins ponctuelles, telles que le contrôle de l'efficacité d'une opération de décontamination ou la détection et la surveillance dans certains endroits stratégiques.

## 8 Efficacité des systèmes autonomes de traitement d'air

Ces systèmes de traitement d'air sont étudiés à part, car ils ne sont pas associés normalement aux systèmes de ventilation, mais plutôt dans certains cas particuliers.

Concernant la transmission microbiologique aéroportée, deux stratégies d'épuration sont à ce jour proposées pour limiter l'exposition des occupants. Elles consistent :

- à diminuer la concentration des aérosols microbiologiques en les diluant (par apport d'air neuf), en les transférant (filtration) ou en amplifiant leur dépôt (ionisation) ;
- à les inactiver en les dénaturant (photolyse) ou en oxydant leur structure biologique (photocatalyse, plasmas froids, etc.).

Dans le cas d'une source de biocontamination endogène aux bâtiments, la mise en œuvre des solutions techniques d'épuration peut se faire au niveau de la centrale de traitement d'air (CTA) et du réseau de distribution d'air ou directement dans les volumes, à proximité des occupants. Cette dernière solution est la plus accessible et propose de petites unités autonomes de « purification » parfois couplées à une fonction de climatisation.

### 8.1 Principes

L'annexe 3 décrit les principales techniques d'épuration de polluants microbiologiques employées. Elles reposent soit sur leur transfert (filtration et ionisation) soit sur leur inactivation (photolyse, photocatalyse et plasma froid (Delaby, 2008).

La filtration est aujourd'hui la technique la plus documentée et éprouvée. Les filtres gravimétriques utilisés dans les CTA équipant les bâtiments recevant du public ont une efficacité très limitée sur les virus. Il existe des filtres à très haute efficacité (THE) dont le coût de mise en œuvre à l'échelle d'un bâtiment limite l'utilisation à des environnements sensibles : laboratoire de microbiologie (P3, P4), bloc opératoire, industries pharmaceutique et agroalimentaire, microélectronique, etc. Des filtres THE peuvent également équiper des systèmes d'épuration autonomes. Dans ce cas, une attention toute particulière devra être portée sur l'intégration étanche du filtre THE à l'appareillage, son entretien, le débit du dispositif et son positionnement en cohérence avec l'aéraulique de l'espace à traiter et les conditions d'exposition des occupants.

Concernant l'utilisation de l'ionisation, la réduction théorique des aérosols chargés est admise, mais aucune publication ne permet de prouver l'efficacité de cette technique pour abaisser l'exposition des occupants aux aérosols microbiologiques.

L'utilisation des rayonnements UV est, au vu des données bibliographiques, susceptible d'inactiver les aérosols viraux par photolyse. Cependant, les dangers d'irradiation associés à l'utilisation des UV et la production de photoproduits, tel l'ozone, nécessitent des précautions particulières quant à la mise en œuvre et l'utilisation de cette technologie.

La photocatalyse appliquée aux aérosols microbiologiques est potentiellement envisageable et de nombreux développements industriels sont en cours pour optimiser cette technologie.

Cependant, à notre connaissance et en dehors de rares évaluations de nature commerciale, aucun résultat n'a été publié sur l'impact de cette technologie sur les aérosols viraux.

Enfin les plasmas froids sont utilisés pour la stérilisation des instruments chirurgicaux, des livres et des surfaces. Les publications s'intéressant à l'application des plasmas froids au traitement de l'air sont rares et à notre connaissance aucune étude n'a permis de valider les effets de cette technologie sur les aérosols viraux.

Pour l'heure, les recherches et développements les plus importants concernent l'inactivation des cellules aérosolisées et plus particulièrement la dégradation photocatalytique dont le procédé équipe quelques systèmes d'épuration commercialisés.

## **8.2 Pertinence des systèmes appliqués à la maîtrise de l'aérocontamination virale**

Une étude menée au CSTB et cofinancée par la DGS a permis d'explorer la pertinence de ces systèmes appliqués à la maîtrise de l'aérocontamination virale des espaces clos. La démarche adoptée visait l'évaluation des performances épuratoires intrinsèques des dispositifs et leur application à une échelle réaliste.

### **8.2.1 Principaux dispositifs commercialisés**

Les systèmes autonomes disponibles sur le marché sont nombreux. Toutefois, aucun de ces dispositifs n'est exclusivement dédié à l'inactivation voire la destruction des microorganismes. En effet leur action est généralement étendue à la dépollution particulaire, chimique (y compris les composés odorants) de l'air. Ainsi, ils combinent généralement plusieurs technologies, dont l'ionisation qui, malgré l'émission reconnue d'ozone est, de par son faible coût et sa mise en œuvre aisée, le procédé le plus employé.

Si la filtration est également largement utilisée, la nature des médias et leur intégration non étanche, du fait notamment de l'absence de joints dans le dispositif, sont rarement cohérentes avec les efficacités revendiquées. On note, par ailleurs, l'absence systématique de certificat attestant de l'efficacité des médias mis en œuvre.

Les dispositifs revendiquant l'inactivation des microorganismes reposent, pour certains, sur l'action d'agents biocides déposés sur le média filtrant, dont on peut craindre le relargage.

Les dispositifs destinés à l'inactivation des microorganismes privilégient, quant à eux, les rayonnements UV-C. Si l'efficacité de cette technologie sur les aérosols microbiologiques est reconnue, la mise en œuvre de ce principe telle qu'observée dans les épurateurs commercialisés pose un certain nombre de questions quant à la dangerosité pour l'utilisateur de ce type de rayonnements et des produits émis à l'occasion de la dégradation des matériaux au voisinage de la lampe par exemple.

Par ailleurs, les débits de fonctionnement communiqués par les fabricants, inférieurs à ceux mesurés, correspondent le plus souvent au débit nominal du ventilateur et ne considèrent pas les pertes de charge du système. Des améliorations portant sur la mise en œuvre des médias filtrants et notamment sur leur étanchéité permettraient probablement d'améliorer les performances de tels dispositifs. Cependant, les pertes de charge liées aux médias filtrants limitent les débits de traitement des dispositifs. A contrario, les dispositifs utilisant exclusivement l'inactivation peuvent fonctionner à des débits bien plus importants, limités, néanmoins, par la cinétique d'inactivation des microorganismes. De plus, l'inactivation des microorganismes permet d'éviter les phénomènes de concentration de polluants microbiologiques plus ou moins persistants sur les parois et médias filtrants des systèmes utilisant exclusivement une épuration physique.

## 8.2.2 Performances épuratoires intrinsèques

Concernant l'évaluation des performances épuratoires intrinsèques, les travaux du CSTB ont porté sur 11 dispositifs du commerce. Une évaluation physique a permis de statuer sur la propension des différents dispositifs à capter puis retenir des aérosols inertes dans deux domaines de taille : 500 nm et 1 µm. Comme attendu, les efficacités de captage des dispositifs testés se sont avérées supérieures pour les systèmes utilisant le principe de la filtration, avec une efficacité culminant à 99% pour les particules de 1 µm. Pour les aérosols plus fins, diamètre centré sur 500 nm, le maximum d'efficacité était de 70,6%. Ce rendement peut également s'exprimer en débit d'air traité par les systèmes testés (Clean Air Delivery Rate, CADR) avec respectivement 299 et 214 m<sup>3</sup>/h.

L'approche biologique a, quant à elle, mis en évidence une réelle efficacité du principe d'inactivation de certains dispositifs basés notamment sur les rayonnements UV-C couplés à un média aux potentialités photocatalytiques avec des performances mesurées de l'ordre de 80% sur un aérosol de virus respiratoire syncytial (VRS), comparables à celles de certains systèmes de filtration mais pour un débit 10 fois moindre.

## 8.2.3 Application des épurateurs en situation réaliste

Le deuxième volet de cette étude, réalisé dans des conditions réalistes, a mis en évidence à la fois le rôle de la ventilation et des épurateurs sur l'exposition des occupants.

### 8.2.3.1 Impact de la ventilation

Dans les conditions expérimentales utilisées par le CSTB, à savoir une ambiance de bureau réaliste avec une centrale de traitement d'air (CTA), la dose inhalée est 1000 fois plus faible sans recyclage de l'air qu'avec recyclage (Delaby, 2008) Dans un contexte de ventilation dégradée (volumes confinés) c'est-à-dire hors ventilation mécanique et sans apport d'air neuf, le niveau d'exposition demeure semblable à celui observé en CTA avec recyclage.

Avec ce dernier système, l'augmentation du taux de renouvellement d'air neuf permet de réduire significativement le niveau d'exposition de l'occupant, avec un abattement de l'ordre de 80% lorsque l'apport d'air neuf passe de 0,9 à 1,6 vol/h. Au-delà de cette dernière valeur, aucun gain supplémentaire, en termes de réduction du niveau d'exposition, n'est observé, ceci en raison de la reprise d'air vicié, inhérent à ce mode de ventilation. Concernant le temps de ½ vie du polluant particulaire, les essais ont montré qu'il décroît à mesure que le renouvellement d'air augmente, passant de 25 à 15 minutes pour respectivement des taux de 1,6 et 2,8 vol/h.

### 8.2.3.2 Épuration en situation réaliste

Cette étude a également démontré le gain de certains épurateurs en conditions réalistes d'utilisation sur le niveau d'exposition des occupants. Ainsi, un dispositif d'épuration basé sur la filtration (nature du filtre : F9 à 150 m<sup>3</sup>/h) apporte un gain sur l'exposition de l'ordre de 74% (en ventilation « double flux » avec un taux de 0,9 vol/h, correspondant à un débit d'air neuf de 23,5 m<sup>3</sup>/h/pers). L'application conjointe de ce système et d'un taux de renouvellement d'air croissant (jusqu'à 2,8 vol/h) conduit finalement à un gain plafonnant à 91%.

Dans les mêmes conditions, un caisson de filtration H14 (efficacité du filtre de 99,995 %), conçu au CSTB, a été employé pour cette étude. Malgré une efficacité intrinsèque et un

débit nominal importants (250 m<sup>3</sup>/h), l'emploi de ce dispositif n'a pas présenté un rendement supérieur au précédent système. En décuplant le débit de ce système (2770 m<sup>3</sup>/h), les auteurs n'ont observé qu'un faible gain supplémentaire de 18% mettant en évidence que la seule augmentation du débit de l'épurateur ne permettait pas de compenser un mauvais rendement de l'appareil du fait d'une aéraulique défailante. En effet, ce dispositif, lors de sa conception, n'avait bénéficié d'aucune attention particulière concernant le captage des aérosols puis la diffusion de l'air traité. Ce résultat met en lumière que l'évaluation de la seule efficacité intrinsèque des dispositifs, qui aurait été dans ce cas de 99,995%, sans tenir compte de leur intégration réaliste dans les bâtiments est insuffisante pour préjuger de ses effets sur le niveau d'exposition des occupants.

Dans des conditions confinées (hors ventilation mécanique), les auteurs ont observé que les épurateurs autonomes étaient les seuls à agir sur l'aéraulique de la pièce, constituant alors probablement un puits pour les polluants. Les aérosols chemineraient ainsi préférentiellement vers le dispositif impliquant une concentration des polluants à son voisinage plus importante. Ainsi, positionné à proximité de l'occupant, le dispositif engendrerait une augmentation du niveau d'exposition ; a contrario, éloigné de celui-ci, il limiterait son exposition.

### 8.3 Conclusion

Les travaux du CSTB tendent à démontrer que l'exposition aux aérosols microbiologiques peut potentiellement être diminuée par l'emploi de stratégies efficaces de réduction de la charge virale en suspension dans l'air et de son potentiel infectieux.

Elles nécessitent cependant l'usage d'une solution technique éprouvée dont les principales caractéristiques à renseigner concernent entre autres :

- la performance intrinsèque de l'épurateur, exprimée en débit d'air épuré (m<sup>3</sup>/h) pour l'agent viral ciblé ;
- la diminution de la charge virale dans les espaces selon la mise en œuvre du système : positionnement dans les volumes, mode de ventilation associé, etc. ;
- l'innocuité du dispositif (production d'ozone, oxydes d'azote, particules ultrafines, composés organiques volatils, etc.) ;
- sa pérennité.

Si les offres commerciales concernant l'épuration de l'air se multiplient, aucune norme ou réglementation ne permet, à ce jour, de valider, même partiellement, les quelques exigences identifiées, limitant ainsi toute préconisation de ces systèmes notamment en cas de pandémie grippale.

## 9 Besoins de connaissances identifiés par le groupe de travail

Au vu du manque de connaissances évoqué dans les chapitres précédents, le groupe de travail recommande d'acquérir des connaissances dans les domaines suivants :

- transmission à distance du virus *Influenza*, en situation expérimentale et sur site ;
- survie des virus *Influenza* dans l'environnement (air, surfaces, etc.) ;
- comportement physico-chimique des virus dans les aérosols ;
- caractérisation des émissions de particules virales par les individus infectés ;
- intégration des épurateurs d'air au sein des bâtiments ;
- développement de méthodes permettant d'étudier les phénomènes aérauliques inhérents aux systèmes de ventilation et notamment les cheminements de l'air au sein des bâtiments ;
- recherche et développement de systèmes intégrés (biocollecteurs et analyses) de détection en continu de virus *Influenza* dans l'air ;
- développement d'outils de caractérisation rapide de souches virales émergentes, afin de mettre au point au plus tôt des réactifs spécifiques de détection et/ou diagnostic.

## 10 Conclusions

Le groupe de travail a réuni et examiné les données disponibles pour évaluer le risque pour l'homme lié à la présence de virus *Influenza* pandémique dans l'air des bâtiments et à son transport éventuel par les dispositifs de ventilation. Il ressort de ce travail que le risque de transmission du virus à distance par les systèmes de ventilation ne peut être exclu au regard des données épidémiologiques et expérimentales disponibles.

La ventilation naturelle ou mécanique intervient peu sur le transport des gouttelettes. En revanche elle joue un rôle ambivalent dans le transport des aérosols contaminés :

- un rôle bénéfique en diluant la quantité de particules virales aérosolisées dans la pièce, d'où une diminution du risque de transmission de proximité entre des individus,
- un rôle potentiellement délétère, dans le cas où la transmission à distance serait confirmée, en favorisant le transport des particules virales par le réseau aéraulique.

Dans le cas où l'on souhaiterait se prémunir de ces risques éventuels ou s'ils venaient à être confirmés, le groupe de travail recommande de maintenir une ventilation efficace, en y associant si possible une ouverture des fenêtres et en supprimant le recyclage de l'air (sauf dans le cas des bureaux paysagés si l'ouverture des fenêtres est impossible).

La détection du virus dans l'air est techniquement possible, mais actuellement limitée à quelques laboratoires spécialisés.

En l'état actuel des connaissances le groupe de travail ne peut émettre de recommandation sur l'efficacité *in situ* des systèmes autonomes de traitement de l'air.

Enfin, des besoins de connaissances ont été identifiés par le groupe de travail.

# 11 Bibliographie

## 11.1 Publications

- Alford R.H., Kasel J.A., Gerone P.J. et al. (1966). Human influenza resulting from aerosol inhalation. *Proc Soc Exp Biol Med.*; 122(3):800-4.
- Andrewes C.H., Glover R.E. (1941). Spread of infection from the respiratory tract of the ferret. I. Transmission of influenza A virus. *Br J Exp Pathol.*; 22:91-7.
- Awofeso N., Fennell M., Waliuzzaman Z. et al. (2001). Influenza outbreak in a correctional facility: *Aust N Z J Public Health*; 25(5):443-6.
- Baron P.A., Willeke K. (2001). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. Wiley-Interscience. 1168 p.
- Bean B., Moore B.M., Sterner B. et al. (1982). Survival of influenza viruses on environmental surfaces. *J Infect Dis.*; 146(1):47-51.
- Benbough J.E. (1971). Some factors affecting the survival of airborne viruses. *J Gen Virol.*; 10(3):209-20.
- Blumenfeld H.L., Kilbourne E.D., Luria D.B. et al. (1959). Studies on influenza in the pandemic of 1957-1958. I. An epidemiologic, clinical and serologic investigation of an intrahospital epidemic, with a note on vaccination efficacy. *J Clin Invest.*; 38(1 Part 2):199-212.
- Bourdillon R.B., Lidwell O.M. (1941). Sneezing and the spread of infection. *Lancet*; 2:2365
- Brankston G., Gitterman L., Hirji Z. et al. (2007). Transmission of influenza A in human beings. *Lancet Infect Dis.*; 7(4):257-65.
- Buckland F.E., Tyrrell D.A. (1962). Loss of infectivity on drying various viruses: *Nature*; 195:1063-4.
- Carabin H., Gyorkos T.W., Soto J.C. et al. Effectiveness of a training program in reducing infections in toddlers attending day care centers. *Epidemiology*; 10(3):219-27.
- Chan-Yeung M., Xu R.H. (2003). SARS: epidemiology. *Respirology*; 8 Suppl.:S9-14.
- Chen Y.C., Chen C.H., Wang C.H. (2008). H5 antibody detection by blocking enzyme-linked immunosorbent assay using a monoclonal antibody. *Avian Dis.*; 52(1):124-9.
- Chotpitayasunondh T., Ungchusak K., Hanshaoworakul W. et al. (2005). Human disease from influenza A (H5N1), Thailand, 2004. *Emerg Infect Dis.*; 11(2):201-9.
- Comité d'experts sur le virus de la grippe et l'équipement de protection respiratoire individuelle (2007). La transmission du virus de la grippe et la contribution de l'équipement de protection respiratoire individuelle : évaluation des données disponibles. Ottawa: Conseil des académies canadiennes. En ligne: [http://www.scienceadvice.ca/documents/\(2007-12-19\)\\_Influenza\\_PPPE\\_rapport\\_complet.pdf](http://www.scienceadvice.ca/documents/(2007-12-19)_Influenza_PPPE_rapport_complet.pdf). [Dernière consultation le 14/05/2009]
- Couch R.B., Cate T.R., Douglas R.G. et al. (1966). Effect of route of inoculation on experimental respiratory viral disease in volunteers and evidence for airborne transmission. *Bacteriol Rev.*; 30(3):517-29.

- Cunney R.J., Bialachowski A., Thornley D. et al. (2000). An outbreak of influenza A in a neonatal intensive care unit. *Infect Control Hosp Epidemiol.*; 21(7):449-54.
- Delaby. S. (2008). Étude expérimentale du transport des aérosols dans un espace clos ventilé et impact des principales stratégies d'épuration microbiologique de l'air sur l'exposition des occupants. Thèse de l'Université Paris XII.
- Diffey B.L. (2002). Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*; 28(1):4-13.
- Downie A.W., Meiklejohn M., St, Vincent L. et al. (1965) The recovery of smallpox virus from patients and their environment in a smallpox hospital. *Bull World Health Organ.*; 33:615–22.
- Drinka P.J., Krause P., Schilling M. et al. (1996). Report of an outbreak: nursing home architecture and influenza-A attack rates. *J Am Geriatr. Soc.* 44(8):910-3.
- Drinka P.J., Krause P., Nest L. et al. (2004). Report of an outbreak: nursing home architecture and influenza-A attack rates: update. *J Am Geriatr Soc.*;52(5):847-8.
- Drummond J.E., Shaw E.E., Antonello J.M. et al. (2008). Design and optimization of a multiplex anti-influenza peptide immunoassay. *J Immunol Methods*; 334(1-2):11-20.
- Duguid J.P. (1946). The Size and the Duration of Air-Carriage of Respiratory Droplets and Droplet-Nuclei. *J Hyg. (Lond)*; 44(6):471-9.
- Dyer D.L., Shinder A., Shinder F. (2000). Alcohol-free instant hand sanitizer reduces elementary school illness absenteeism. *Fam Med.*; 32(9):633-8.
- Edwards D.A., Man J.C., Brand P. et al. (2004). Inhaling to mitigate exhaled bioaerosols. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.*; 101(50):17383-8.
- Ezratty V., Squinazi F. (2008). Virus influenza pandémique à l'intérieur des bâtiments : quel risque de transmission par les systèmes de ventilation ou de climatisation ? *ERS*; 7(4):255-63.
- Fabian P., McDevitt J.J., DeHaan W.H., et al. (2008). Influenza virus in human exhaled breath: an observational study. *PLoS ONE* ;16;3(7):e2691.
- Fairchild C.I., Stampfer J.F. (1987). Particle concentration in exhaled breath. *Am Ind Hyg Assoc J.*; 48(11):948-9.
- Falsey A.R., Criddle M.M., Kolassa J.E. et al. (1999). Evaluation of a handwashing intervention to reduce respiratory illness rates in senior day-care centers. *Infect Control Hosp Epidemiol.*; 20(3):200-2.
- Frankova V. (1975). Inhalatory infection of mice with influenza A0/PR8 virus. I. The site of primary virus replication and its spread in the respiratory tract. *Acta Virol.*; 19(1):29-34.
- Gall A., Hoffmann B., Harder T. et al. (2008). Universal primer set for amplification and sequencing of HA0 cleavage sites of all influenza A viruses. *J Clin Microbiol.*; 46(8):2561-7.
- Gary C. (1974). L'effet de couronne en tension alternative. Paris: Eyrolles.
- Gerone P.J., Couch R.B., Keefer G.V. et al. (1966). Assessment of experimental and natural viral aerosols. *Bacteriol Rev.*; 30(3):576-88.
- Gilet J.C., Laforest J.C., Mereau P. (1946). Ionisation négative de l'air : synthèse bibliographique et enquête exploratoire en entreprise: Cahiers de notes documentaires; 146 :15-26.
- Goldstein N.I., Goldstein R.N., Merzlyak M.N. (1992). Negative air ions as a source of superoxide. *Int J Biometeorol.*; 36(2):118-22.
- Grabarczyk Z. (2001). Effectiveness of indoor air cleaning with corona ionizers. *J Electrostat.*; 51-52:278-83.

- Greene V.M., Vesley D., Keenan K.M. (1962). New method for microbiological sampling of surfaces. *J Bacteriol.*; 84(1):188-9.
- Gustafson T.L., Lavelly G.B., Brawner E.R. et al. (1982). An outbreak of airborne nosocomial varicella. *Pediatrics*; 70(4):550-6.
- Harm W. (1980). *Biological Effects Ultraviolet Radiation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Harper G.J. (1961). Airborne micro-organisms: survival tests with four viruses. *J Hyg. (Lond)*; 59:479-86.
- Hemmes J.H., Winkler K.C., Kool S.M. (1960). Virus survival as a seasonal factor in influenza and poliomyelitis. *Nature*; 188:430-1.
- Henle W., Henle G., Stokes J. et al. (1946). Experimental Exposure of Human Subjects to Viruses of Influenza. *J Immunol.*; 52(2):145-65.
- Hollaender A., Oliphant J.W. (1944). The Inactivating Effect of Monochromatic Ultraviolet Radiation on Influenza Virus. *J Bacteriol.*; 48(4):447-54.
- Jakab G.J., Knight M.E. (1982). Decreased influenza virus pathogenesis by infection with germicidal UV-irradiated airborne virus. *Environ Int.*; 8(1-6):415-8.
- Jao R.L., Wheelock E.F., Jackson G.G. (1970). Production of interferon in volunteers infected with Asian influenza. *J Infect Dis.*; 121(4):419-26.
- Kethley T.W., Branch K. (1972). Ultraviolet lamps for room air disinfection. Effect of sampling location and particle size of bacterial aerosol. *Arch Environ Health*; 25(3):205-14.
- Khater F.J., Moorman J.P. (2003). Severe acute respiratory syndrome: an overview. *South Med J.*; 96(9):907-10.
- Kirchner S., Lucas J.P., Riberon J. (2008). Etat de la ventilation dans les logements français. Atelier de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur "ventilation dans les logements et les écoles". Paris: OQAI. 13 p.
- Klontz K.C., Hynes N.A., Gunn R.A. et al. (1989). An outbreak of influenza A/Taiwan/1/86 (H1N1) infections at a naval base and its association with airplane travel. *Am J Epidemiol.*; 129(2):341-8.
- Knight V. (1980). Viruses as agents of airborne contagion. *Ann N Y Acad Sci.*; 353:147-56.
- Ko G., First M.W., Burge H.A. (2000). Influence of relative humidity on particle size and UV sensitivity of *Serratia marcescens* and *Mycobacterium bovis* BCG aerosols. *Tuber. Lung Dis.*; 80(4-5):217-28.
- Koffi J., Riberon J., Husaunndee A. et al. (2007). Experimental study of pollutant transfer within dwellings. Proceedings of RoomVent 2007, 10th International Conference on Air distribution in rooms. 13-15 June, Helsinki, Finland.
- Kosenko E.A., Kaminsky Y., Stavrovskaya I.G. et al. (1997). The stimulatory effect of negative air ions and hydrogen peroxide on the activity of superoxide dismutase. *FEBS Lett.*; 410(2-3):309-12.
- Kowalski W.J., Bahnfleth W.P., Witham D.L. et al. (2000). Mathematical Modeling of Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection. *Quant Microbiol.*; 2(3):249-70.
- Laboratoire de physique des gaz et des plasmas (2007). "Décharges hors-équilibre et cinétiques à haute pression."
- Lai K.M., Burge H.A., First M.W. (2004). Size and UV germicidal irradiation susceptibility of *Serratia marcescens* when aerosolized from different suspending media. *Appl Environ Microbiol.*; 70(4):2021-7.

- Laroussi M., Leipold F. (2004). Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure. *Int J Mass Spectrom.*; 233(1-3):81-6.
- Larson E.L., Lin S.X., Gomez-Pichardo C. et al. (2004). Effect of antibacterial home cleaning and handwashing products on infectious disease symptoms: a randomized, double-blind trial. *Ann Intern Med.*; 140(5):321-9.
- Lester W. (1948). The influence of relative humidity on the infectivity of air-borne influenza A virus, PR8 strain. *J Exp Med.*; 88(3):361-8.
- Leung T.F., Wong G.W., Hon K.L. et al. (2003). Severe acute respiratory syndrome (SARS) in children: epidemiology, presentation and management. *Paediatr Respir Rev.*; 4(4):334-9.
- Li R.W., Leung K.W., Sun F.C., Samaranayake L.P. (2004). Severe acute respiratory syndrome (SARS) and the GDP. Part II: implications for GDPs. *Br Dent. J.*; 197(3):130-4.
- Liang W.N., Huang Y., Zhou W.X. et al. (2003). Epidemiological characteristics of an outbreak of severe acute respiratory syndrome in Dongcheng District of Beijing from March to May 2003. *Biomed Environ Sci.*; 16(4):305-13
- Little J.W., Douglas R.G., Hall W.J. et al. (1979). Attenuated influenza produced by experimental intranasal inoculation. *J Med Virol.*; 3(3):177-88.
- Lo J.Y., Tsang T.H., Leung Y.H. et al. (2005). Respiratory infections during SARS outbreak, Hong Kong, 2003. *Emerg Infect Dis.*; 11(11):1738-41.
- Loosli C.G., Lemon H.M., Robertson O.H. et al. (1943). Experimental airborne influenza infection. I. Influence of humidity on survival of virus in air. *Proc Soc Exp Bio Med.*; 53:205-6.
- Loudon R.G., Roberts R.M. (1967). Droplet expulsion from the respiratory tract. *Am Rev Respir Dis.*; 95(3):435-42.
- Lowen A.C., Mubareka S., Tumpey T.M. et al. (2006). The guinea pig as a transmission model for human influenza viruses. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.*; 103(26):9988-92.
- Lowen A.C., Mubareka S., Steel J. et al. (2007). Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. *PLoS Pathog.*; 3(10):1470-6.
- Luby S.P., Agboatwalla M., Feikin D.R. et al. (2005). Effect of handwashing on child health: a randomised controlled trial. *Lancet*; 366(9481):225-33.
- Lytle C.D., Sagripanti J.L. (2005). Predicted inactivation of viruses of relevance to biodefense by solar radiation. *J Virol.*; 9(22):14244-52.
- Matsunaga T., Tomoda R., Nakajima T. (1985). Photoelectrochemical sterilization of microbial cells by semiconductor powders. *FEMS Microbiol Lett.*; 29:211-4.
- Mayya Y.S., Sapra B.K., Khan A. et al. (2004). Aerosol removal by unipolar ionization in indoor environments. *J Aerosol Sci.*; 35(8):923-41.
- McLean R.L. (1959). The effect of ultraviolet radiation upon the transmission of epidemic influenza in long-term hospital patient. *Am Rev Tuberc Pulm Dis.*; 79:841.
- McLean R.L. (1961). Discussion after paper: the mechanism of spread of Asian influenza. *Am Rev Respir Dis.*; 83:36-8.
- Mims F.M. (2005). Avian influenza and UV-B blocked by biomass smoke. *Environ Health Perspect.*; 113(12):A806-A807.
- Moisan M., Barbeau J., Moreau S. et al. (2001). Low-temperature sterilization using gas plasmas: a review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms. *Int J Pharm.*; 226(1-2):1-21.

- Morawska L. (2006). Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air.*; 16(5):335-47.
- Morens D.M., Rash V.M. (1995). Lessons from a nursing home outbreak of influenza A. *Infect Control Hosp Epidemiol.*; 16(5):275-80.
- Moser M.R., Bender T.R., Margolis H.S. et al. (1979). An outbreak of influenza aboard a commercial airliner. *Am J Epidemiol.*; 110(1):1-6.
- Mumford J.A., Hannant D., Jessett D.M. (1990). Experimental infection of ponies with equine influenza (H3N8) viruses by intranasal inoculation or exposure to aerosols. *Equine Vet J.*; 22(2):93-8.
- Munoz F.M., Campbell J.R., Atmar R.L. et al. (1999). Influenza A virus outbreak in a neonatal intensive care unit. *Pediatr Infect Dis J.*; 18(9):811-5.
- Murphy B.R., Kasel J.A., Chanock R.M. (1972). Association of serum anti-neuraminidase antibody with resistance to influenza in man. *N Engl J Med.*; 286(25):1329-32.
- Neumann G., Kawaoka Y. (2006). Host range restriction and pathogenicity in the context of influenza pandemic. *Emerg Infect Dis.*; 12(6):881-6.
- Ng L.F., Barr I., Nguyen T. et al. (2006). Specific detection of H5N1 avian influenza A virus in field specimens by a one-step RT-PCR assay. *BMC Infect Dis.*; 6:40.
- Niu J.L., Tung T.C.W., Burnett J. (2001). Quantification of dust removal and ozone emission of ionizer air-cleaners by chamber testing. *J Electrostat.*; 51-52:20-4.
- Noakes C.J., Fletcher L.A., Beggs C.B. et al. (2004). Development of a numerical model to simulate the biological inactivation of airborne microorganisms in the presence of ultraviolet light. *J Aerosol Sci.*; 35(4):489-507.
- Offermann F.J., Sextro R.G., Fisk W.J. et al. (1985). Control of respirable particles in indoor air with portable air cleaners. *Atmos Environ.*; 19(11):1761-71.
- Papineni R.S., Rosenthal F.S. (1997). The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects. *J Aerosol Med.*; 10(2):105-16.
- Parker E.R., Dunham W.B., MacNeal W.J. (1944). Resistance of the melbourne strain of influenza virus to desiccation. *J Lab Clin Med.*; 29:37-42.
- Parts T.E., Luts A. (2004). Observed and simulated effects of certain pollutants on small air ion spectra: I. Positive ions. *Atmos Environ.*; 38(9):1283-9.
- Peccia J.L., Werth H.M., Hernandez M.T. (2000). Effects of relative humidity on the UV-induced inactivation of bacterial bioaerosols. *J Aerosol Sci.*; 31(Suppl.1):959-60.
- Peiris J.S., de J., Guan Y. (2007). Avian influenza virus (H5N1): a threat to human health. *Clin Microbiol Rev.*; 20(2):243-67.
- Ponka A., Poussa T., Laosmaa M. (2004). The effect of enhanced hygiene practices on absences due to infectious diseases among children in day care centers in Helsinki. *Infection*; 32(1):2-7.
- Rauth A.M. (1965). The Physical State of Viral Nucleic Acid and the Sensitivity of Viruses to Ultraviolet Light. *Biophys J.*; 5(3):257-73.
- Richardson G., Eick S.A., Harwood D.J. et al. (2003). Negative air ionisation and the production of hydrogen peroxide. *Atmos Environ.*; 37(26):3701-6.
- Riley E.C., Murphy G., Riley R.L. (1978). Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *Am J Epidemiol.*; 107(5):421-32.
- Riley R.L. (1974). Airborne infection. *Am J Med.*; 57(3):466-75.

- Roberts L., Smith W., Jorm L. et al. (2000). Effect of infection control measures on the frequency of upper respiratory infection in child care: a randomized, controlled trial. *Pediatrics*; 105(4Pt1):738-42.
- Roy C.J., Milton D.K. (2004). Airborne transmission of communicable infection--the elusive pathway. *N Engl J Med.*; 350(17):1710-2.
- Ryan M.A., Christian R.S., Wohlrabe J. (2001). Handwashing and respiratory illness among young adults in military training. *Am J Prev Med.*; 21(2):79-83.
- Sagripanti J.L., Lytle C.D. (2007). Inactivation of influenza virus by solar radiation. *Photochem Photobiol.*; 83(5):1278-82.
- Sakaguchi M., Yoshikawa Y., Yamanouchi K. et al. (1986). Growth of measles virus in epithelial and lymphoid tissues of cynomolgus monkeys. *Microbiol Immunol.*; 30(10):1067-73.
- Sampathkumar P., Temesgen Z., Smith T.F. et al. (2003). SARS: epidemiology, clinical presentation, management, and infection control measures. *Mayo Clin Proc.*; 78(7):882-90.
- Sawyer M.H., Chamberlin C.J., Wu Y.N. et al. (1994). Detection of varicella-zoster virus DNA in air samples from hospital rooms. *J Infect Dis.*; 169(1):91-4.
- Schaffer F.L., Soergel M.E., Straube D.C. (1976). Survival of airborne influenza virus: effects of propagating host, relative humidity, and composition of spray fluids. *Arch Virol.*; 51(4):263-73.
- Schulman J.L., Kilbourne E.D. (1962). Airborne transmission of influenza virus infection in mice. *Nature*; 195:1129-30.
- Schulman J.L., Kilbourne E.D. (1963). Experimental transmission of influenza virus infection in mice. II. Some factors affecting the incidence of transmitted infection. *J Exp Med.*; 118:267-75.
- Shaman J., Kohn M. (2009). Absolute humidity modulates influenza survival, transmission, and seasonality. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.*; 106(9):3243-8.
- Sharma A., Pruden A., Yu Z., Collins G.J. (2005). Bacterial inactivation in open air by the afterglow plume emitted from a grounded hollow slot electrode. *Environ Sci Technol.*; 39(1):339-44.
- Shinya K., Ebina M., Yamada S. et al. (2006). Avian flu: influenza virus receptors in the human airway. *Nature*; 440(7083):435-6.
- Skinner H.H., Bradish C.J. (1954). Exposure to light as a source of error in the estimation of the infectivity of virus suspensions. *J Gen. Microbiol.*; 10(3):377-97.
- Snyder M.H., Stephenson E.H., Young H. et al. (1986). Infectivity and antigenicity of live avian-human influenza A reassortant virus: comparison of intranasal and aerosol routes in squirrel monkeys. *J Infect Dis.*; 154(4):709-11.
- Tang J.W., Li Y., Eames I. et al. (2006). Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises. *J Hosp Infect.* ; 64(2):100-14.
- Taubenberger J.K. (2006). Characterization of the 1918 influenza virus polymerase genes. *Nature*; 437(7060): 889-93.
- Tellier R. (2007). Transmission of influenza A in human beings. *Lancet Infect Dis.*; 7(12):759-60.
- Tsukamoto K., Imada T., Tanimura N. et al. (2007). Impact of different husbandry conditions on contact and airborne transmission of H5N1 highly pathogenic avian influenza virus to chickens. *Avian Dis.*; 51(1):129-32.
- Uhari M., Mottonen M. (1999). An open randomized controlled trial of infection prevention in child day-care centers. *Pediatr Infect Dis J.*; 18(8):672-77.
- Van R.D., Munster V.J., de W.E. et al. (2006). H5N1 Virus Attachment to Lower Respiratory Tract. *Science*; 312(5772):399.

- Varia M., Wilson S., Sarwal S. et al. (2003). Investigation of a nosocomial outbreak of severe acute respiratory syndrome (SARS) in Toronto, Canada. *CMAJ*; 169(4):285-92.
- Walz-Cicconi M.A., Rose R.M., Dammin G.J. et al. (1986). Inoculation of guinea pigs with varicella-zoster virus via the respiratory route. *Arch Virol.*; 88(3-4):265-77.
- Wells W.F., Henle W. (1941). Experimental air-borne disease. Quantitative inoculation by inhalation of influenza virus. *Proc Soc Exp Biol Med.*; 48:298-301.
- Wells W.F., Wells M.W., Wilder T.S. (1942). The environmental control of epidemic contagion. I. An epidemiologic study of radiant disinfection of air in day schools. *Am J Epidemiol.*; 35(1):97-121.
- White C., Kolble R., Carlson R. et al. (2003). The effect of hand hygiene on illness rate among students in university residence halls. *Am J Infect Control.*; 31(6):364-70.
- Wu C.C., Lee G.W.M. (2004). Oxidation of volatile organic compounds by negative air ions: *Atmos Environ.*; 38(37):6287-95.
- Wu C.C., Lee G.W., Cheng P et al. (2006a). Effect of wall surface materials on deposition of particles with the aid of negative air ions. *J Aerosol Sci.*; 37(5):616-30.
- Wu C.C., Lee G.W., Yang S. et al. (2006b). Influence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air. *Sci Total Environ.*; 370(1):245-53.
- Yu I.T., Li Y., Wong T.W. et al. (2004). Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. *N Engl J Med.*; 350(17):1731-9.
- Yuen K.Y., Chan P.K., Peiris M. et al. (1998). Clinical features and rapid viral diagnosis of human disease associated with avian influenza A H5N1 virus. *Lancet*; 351(9101):467-71.
- Zhu S., Kato S., Yang J.H. (2006). Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment. *Build Environ.*; 41(12):1691-1702.

## 11.2 Normes

- Norme NF EN 1822-1, Filtres à air à très haute efficacité et filtres à air à très faible pénétration (HEPA et ULPA)." (1998).
- Norme NF EN 779, Filtres à air de ventilation générale pour l'élimination des particules - Détermination des performances de filtration." (2003).

## 11.3 Législation et réglementation

- Arrêté du 14 novembre 1958 relatif à l'aération des logements. *JORF* du 18 novembre 1958.
- Arrêté du 22 octobre 1969 relatif à l'aération des logements. *JORF* du 30 octobre 1969.
- Arrêté du 24 mars 1982 modifié par l'arrêté du 28 octobre 1983 (*JORF* du 15 novembre 1983) relatif à l'aération des logements : aération générale ou permanente, aération permanente pouvant être limitée à certaines pièces. *JORF* du 27 mars 1982.
- Circulaire du 20 janvier 1983 relative à la révision du règlement sanitaire départemental type. *JORF* du 25 février 1983.

---

# ANNEXES

---

## Annexe 1 : Lettre de saisine



Ministère de la Santé et des Solidarités

COURRIER RECOMMANDÉ  
10 AVR. 2006  
-1408

Paris, le 05 AVR. 2006

*Madame: Crouzet*

*diffusé CFS  
+ M<sup>lle</sup> Camille Scailly  
+ P<sup>r</sup> du CA*

Le Directeur général de la Santé *DS/S/SSTC/132*  
Délégué interministériel à la lutte contre la grippe aviaire

à

Madame la directrice générale  
Agence Française de Sécurité Sanitaire  
Environnementale et du travail

27-31 Avenue du Général Leclerc  
BP 19  
94701 MAISONS ALFORT

**Objet :** Evaluation du risque sanitaire pour l'homme lié à la présence de virus Influenza pandémique dans l'air des bâtiments et à sa diffusion éventuelle par les dispositifs de ventilation

Le risque d'émergence d'un virus grippal pandémique, notamment par adaptation d'un virus Influenza aviaire ne pouvant être écarté et devant être anticipé, je vous sollicite pour évaluer les risques sanitaires qui seraient liés à la diffusion de virus pandémique à l'intérieur des bâtiments (établissements recevant du public, immeubles de bureaux, logements collectifs) par les systèmes de ventilation, en tenant compte notamment des différentes technologies et de leurs spécificités techniques telles que le recyclage, le traitement ou la déshumidification de l'air.

A l'issue de cette évaluation, vous voudrez bien mettre en évidence :

- les recommandations qui peuvent être émises afin d'éviter la diffusion de ces virus dans les bâtiments en fonction des situations distinguées dans le plan gouvernemental ;
- les besoins de recherche à mener.

Je vous remercie de bien vouloir m'adresser, avant l'été, un rapport intermédiaire sur les points précités.

Outre cette évaluation du risque, je vous demande d'apprécier et ce, pour le mois d'octobre 2006, toujours dans une situation de transmission humaine de virus grippal pandémique :

- les capacités potentielles des laboratoires à procéder à des mesures de quantités de virus Influenza dans l'air ;
- l'efficacité de mesures d'aération par ouvrants pour diminuer la concentration en virus dans l'air intérieur ;
- la pertinence de recourir à des dispositifs, mobiles ou non, de traitement d'air dans les locaux, susceptibles d'abaisser l'exposition des populations.

Professeur Didier ROUSSIN  
*Didier Roussin*  
Le Directeur Général de la Santé

11, avenue Duquesne - 75320 Paris 07 SF  
Tél. : 01 40 56 60 03 - Télécopie : 01 40 56 40 56 - [www.afssets.fr](http://www.afssets.fr) - [www.santefr.fr](http://www.santefr.fr)

## Annexe 2 : Dispositions réglementaires relatives à l'aération et la ventilation dans les bâtiments

### 1. Dispositions réglementaires relatives à l'aération et l'assainissement des lieux de travail

Selon les articles R. 4222-4 à R. 4222-7 du code du travail, dans les locaux à pollution non spécifique (locaux dans lesquels la pollution est liée à la seule présence humaine), c'est-à-dire bureaux, salles de réunion, locaux de formation, l'aération doit avoir lieu, soit par ventilation mécanique, soit par ventilation naturelle permanente. Dans ce dernier cas, les locaux doivent comporter des ouvrants donnant directement sur l'extérieur et dont les dispositifs de commande sont accessibles aux occupants.

L'aération exclusive par ouverture de fenêtres ou autres ouvrants donnant directement sur l'extérieur est autorisée lorsque le volume par occupant est égal ou supérieur à :

- a) 15 m<sup>3</sup> pour les bureaux ainsi que pour les locaux où est effectué un travail physique léger ;
- b) 24 m<sup>3</sup> pour les autres locaux.

Les locaux réservés à la circulation et les locaux qui ne sont occupés que de manière épisodique peuvent être ventilés par l'intermédiaire des locaux adjacents à pollution non spécifique sur lesquels ils ouvrent.

Dans les locaux à pollution non spécifique, lorsque l'aération est assurée par des dispositifs de ventilation, le débit minimal d'air neuf à introduire par occupant est fixé dans le tableau ci-après :

**Tableau 1 : Débit minimal d'air neuf par occupant à respecter, dans les locaux à pollution non spécifique**

Désignation des locaux	Débit minimal d'air neuf par occupant (en m <sup>3</sup> par heure)
Bureaux, locaux sans travail physique	25
Locaux de restauration, locaux de vente, locaux de réunion	30
Ateliers et locaux avec travail physique léger	45
Autres ateliers et locaux	60

## 2. Dispositions réglementaires relatives à l'aération des logements

Avant 1937, aucun texte ne définissait de dispositions concernant l'aération des logements. Les logements construits avant cette date peuvent donc ne comporter aucun dispositif spécifique de ventilation. Dans ce cas, l'aération s'effectue principalement par les défauts d'étanchéité et l'ouverture des fenêtres.

**Le 1<sup>er</sup> avril 1937**, le premier règlement sanitaire départemental impose la ventilation permanente du cabinet d'aisances.

**L'arrêté du 14 novembre 1958** « aération des logements » (JO du 18 novembre 1958) fixe les dispositions ayant pour objet d'assurer en permanence le renouvellement d'air des pièces principales et des cuisines, de telle manière que soient maintenues de bonnes conditions de salubrité en ce qui concerne l'air expiré et les condensations. Les pièces principales des logements à simple exposition et celles équipées de baies vitrées étanches doivent comporter des ouvertures d'entrée d'air et des ouvertures d'évacuation d'air. Les cuisines doivent comporter des ouvertures totales d'au moins 150 cm<sup>2</sup> destinées à l'évacuation de l'air.

**L'arrêté du 22 octobre 1969** « aération des logements » (JO du 30 octobre 1969) fixe le principe de la ventilation générale et permanente par balayage : l'air entre dans les pièces principales du logement par des orifices d'entrée d'air et est extrait dans les pièces de service soit par des conduits à tirage naturel, soit par des dispositifs mécaniques. Le taux de renouvellement d'air est d'environ une fois le volume des pièces principales par heure.

L'Article 8 du décret n°69-596 du 14 juin 1969 fixant les règles générales de construction des bâtiments d'habitation stipule que « les logements doivent bénéficier d'un renouvellement de l'air et d'une évacuation des émanations tels que les taux de pollution de l'air intérieur du local ne constituent aucun danger pour la santé et que puissent être évitées les condensations, sauf de façon passagère ».

**L'arrêté du 24 mars 1982** « dispositions relatives à l'aération des logements » (JO du 27 mars 1982) maintient le principe de la ventilation générale et permanente mais introduit la notion de modulation du débit d'extraction par dispositif manuel. Les exigences sont exprimées en débits d'air extrait dans chaque pièce de service. Les valeurs données pour chaque pièce de service sont fonction du nombre de pièces principales du logement. Les débits exigés sont réduits par rapport à ceux exigés par l'arrêté de 1969.

L'article 3 stipule que, dans les conditions climatiques moyennes d'hiver, les débits extraits dans chaque pièce de service doivent pouvoir atteindre, simultanément ou non, les valeurs données dans le tableau ci-après :

**Tableau 2 : Débits d'extraction d'air dans les pièces de services en m<sup>3</sup> par heure**

Nombre de pièces principales dans le logement	Débits exprimés en m <sup>3</sup> par heure				
	Cuisine	Salle de bains ou de douches commune ou non avec un cabinet d'aisances	Autre salle d'eau	Cabinet d'aisances	
				unique	multiple
1	75	15	15	15	15
2	90	15	15	15	15
3	105	30	15	15	15
4	120	30	15	30	15
5 et plus	135	30	15	30	15

L'article 4 stipule que des dispositifs individuels de réglage peuvent permettre de réduire les débits définis à l'article 3 à condition que le débit total extrait et le débit réduit de cuisine soient au moins égaux aux valeurs données dans le tableau suivant :

**Tableau 3 : Débits d'extraction d'air à respecter en fonction du débit total minimal et du débit réduit minimal en cuisine**

Nombre de pièces principales dans le logement	Débits exprimés en m <sup>3</sup> par heure	
	Débit total minimal	Débit réduit minimal
1	35	20
2	60	30
3	75	45
4	90	45
5	105	45
6	120	45
7	135	45

L'Article R.111-9 du Code de la Construction et de l'Habitation stipule que « les logements doivent bénéficier d'un renouvellement de l'air et d'une évacuation des émanations tels que les taux de pollution de l'air intérieur du local ne constituent aucun danger pour la santé et que puissent être évitées les condensations, sauf de façon passagère ».

L'arrêté du 28 octobre 1983 « dispositions relatives à l'aération des logements » (JO du 15 novembre 1983) modifie les dispositions de l'arrêté du 24 mars 1982. Par ce texte, l'aération peut être assurée par un dispositif mécanique qui module automatiquement le renouvellement d'air du logement (système de ventilation hygroréglable).

### 3. Dispositions réglementaires relatives à l'aération des établissements recevant du public

Les établissements recevant du public sont soumis à plusieurs réglementations :

- Code de la construction et de l'habitation (CCH) qui détermine leur catégorie en fonction de leur capacité d'accueil du public et/ou, du personnel :
  - 1<sup>e</sup> catégorie : au- dessus de 1 500 personnes ;
  - 2<sup>e</sup> catégorie : de 701 à 1 500 personnes ;
  - 3<sup>e</sup> catégorie : de 301 à 700 personnes ;
  - 4<sup>e</sup> catégorie : 300 personnes et au-dessous à l'exception des établissements de 5<sup>e</sup> catégorie ;
  - 5<sup>e</sup> catégorie : établissements dans lesquels l'effectif du public n'atteint pas le chiffre minimum fixé par le règlement de sécurité pour chaque type d'exploitation (R.123-14).

Pour les ERP de la 1<sup>e</sup> à la 4<sup>e</sup> catégorie, l'effectif pris en compte comprend le public et le personnel n'occupant pas de locaux indépendants qui posséderaient leurs propres dégagements.

Pour les ERP de 5<sup>e</sup> catégorie, l'effectif ne comprend que le public.

- Règlement de sécurité contre l'incendie relatif aux établissements recevant du public qui les classe en fonction de leur activité en type désigné par une lettre clé :

**Tableau 4 : Typologie des établissements recevant du public**

TYPE (règlement de sécurité incendie)	
<b>J</b>	Structures d'accueil pour personnes âgées et personnes handicapées
<b>L</b>	Salles d'auditions, de conférences, de réunions, de spectacles ou à usage multiple
<b>M</b>	Magasins de vente, centres commerciaux
<b>N</b>	Restaurants et débits de boissons
<b>O</b>	Hôtels et pensions de famille
<b>P</b>	Salles de danse et salles de jeux
<b>R</b>	Établissements d'enseignement, colonies de vacances
<b>S</b>	Bibliothèques, centres de documentation
<b>T</b>	Salles d'exposition
<b>U</b>	Établissements sanitaires
<b>V</b>	Établissements de culte
<b>W</b>	Administrations, banques, bureaux
<b>X</b>	Établissements sportifs couverts
<b>Y</b>	Musées
<b>ETABLISSEMENTS SPECIAUX</b>	

<b>PA</b>	Établissements de plein air
<b>CTS</b>	Chapiteaux, tentes et structures itinérants ou à implantation prolongée ou fixe
<b>SG</b>	Structures gonflables
<b>PS</b>	Parcs de stationnement couverts
<b>OA</b>	Hôtels restaurants d'altitude
<b>GA</b>	Gares accessibles au public
<b>EF</b>	Établissements flottants ou bateaux stationnaires et bateaux
<b>REF</b>	Refuges de montagne
<b>IMMEUBLES DE GRANDE HAUTEUR (IGH)</b>	
<b>GHA</b>	Habitation
<b>GHO</b>	Hôtel
<b>GHR</b>	Enseignement
<b>GHS</b>	Dépôt d'archives
<b>GHU</b>	Usage sanitaire
<b>GHW</b>	Bureaux
<b>GHZ</b>	Usage mixte

– Règlement sanitaire départemental

Selon le règlement de sécurité contre l'incendie relatif aux ERP des catégories 1<sup>e</sup> à 4<sup>e</sup> (Livre II, Titre I, chapitre V, section VII : Traitement d'air et ventilation, art.CH 28 modifié par l'arrêté du 14 février 2000) : « *un système de ventilation mécanique ou naturelle doit être installé conformément aux spécifications du REGLEMENT SANITAIRE DEPARTEMENTAL dans toutes les parties de l'établissement ouverts au public ou occupées par le personnel* »

Selon le Règlement Sanitaire Départemental (Titre III - Art. 62-2, Art., 64-1) : « Les débits et volumes indiqués ci-après s'appliquent exclusivement aux personnes qui n'exercent pas d'activité salariée dans les différentes catégories de locaux concernés.

**Tableau 5 : Débit minimal d'air neuf à respecter dans les locaux à pollution non spécifique, d'après la circulaire du 20 janvier 1983 relative à la révision du règlement sanitaire départemental type**

Destination des locaux	Débit minimal d'air neuf exprimé en <b>litres par seconde et par occupant</b> traduit en <b>mètres cubes par heure par occupant</b> (air à 1,2 kg/m <sup>3</sup> )	
	Locaux dans lesquels il est interdit de fumer en m <sup>3</sup> / h / occupant	Locaux dans lesquels il n'est pas interdit de fumer en m <sup>3</sup> / h / occupant
Locaux d'enseignement : Classes, salle d'études, laboratoires (à l'exclusion de ceux à pollution spécifique) : * écoles maternelles, primaires et secondaires du 1 <sup>er</sup> cycle * secondaires du 2 <sup>e</sup> cycle et universitaires	<b>15</b> <b>18</b>	- <b>25</b>
Ateliers	<b>18</b>	<b>25</b>
Locaux d'hébergement : Chambres, dortoirs, cellules, salle de repos	<b>18</b>	<b>25</b>
Bureaux et locaux assimilés : Tels que locaux d'accueil, bibliothèques, bureaux de poste, banques	<b>18</b>	<b>25</b>
Locaux de réunions : Tels que salles de réunions, de spectacles, de culte, clubs Foyers	<b>18</b>	<b>30</b>
Locaux de vente : Tels que boutiques, supermarchés	<b>22</b>	<b>30</b>
Locaux de restauration : Cafés, bars, restaurants, cantines, salles à manger	<b>22</b>	<b>30</b>
Locaux à usage sportif : Par sportif : <ul style="list-style-type: none"> <li>• dans une piscine</li> <li>• dans les autres locaux</li> </ul>	<b>22</b> <b>25</b>	- <b>30</b>
Par spectateur	<b>18</b>	<b>30</b>

Pour les locaux où la présence humaine est épisodique (dépôts, archives, circulations, halls d'entrée, etc.) et où la distribution intérieure ne permet pas qu'ils soient ventilés par l'intermédiaire des locaux adjacents, le débit minimal d'air neuf à introduire est de 0,1 litre par seconde et par mètre carré.

En aucun cas, dans les conditions habituelles d'occupation, la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone ne doit dépasser 1/1000 avec tolérance de 1,3/1000 dans les locaux où il est interdit de fumer.

Si la densité d'occupation des locaux est très variable, la ventilation modulée ou discontinue est admise sous réserve que la teneur en dioxyde de carbone ne dépasse pas les valeurs fixées précédemment.

## Annexe 3 : Descriptifs des systèmes de traitement d'air

Ce document décrit les principales techniques d'épuration : par transfert (filtration et ionisation) ou inactivation (photolyse, photocatalyse et plasma froid), ainsi que leurs potentielles applications à la maîtrise de l'aérocontamination virale des espaces clos.

### 1. Filtration mécanique

La filtration mécanique consiste à séparer la fraction solide de l'air par collecte sur un média. Classiquement, cinq mécanismes physiques sont identifiés comme responsables de la collecte des particules par les fibres : la diffusion brownienne, l'interception directe, l'impaction inertielle et, dans une moindre mesure, le tamisage et les forces électrostatiques. L'efficacité globale et celles des mécanismes dominants varie selon le domaine de taille des aérosols considérés.

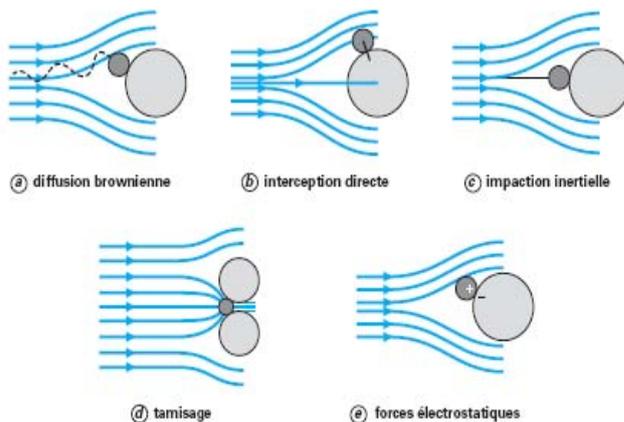


Figure 7 : Représentation des mécanismes de capture sur une fibre collectrice

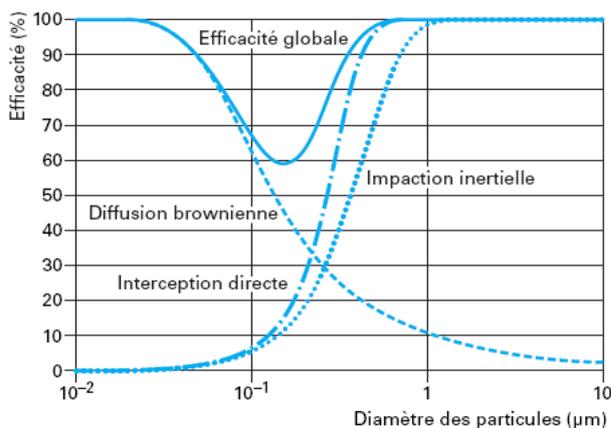


Figure 8 : Allure des efficacités unitaire fractionnelles d'un média fibreux en fonction de la taille des particules

Les normes NF EN 779 et NF EN 1822 proposent une classification des filtres à air selon leur efficacité de rétention des aérosols.

### 1.1 Filtres de type gravimétrique (G) et opacimétrique (F)

Les filtres du groupe G ont pour unique fonction de filtrer les particules grossières (poussières, débris végétaux, etc.). L'efficacité de ces filtres, désignée par le terme d'« arrestance moyenne » ( $A_m$ ), est obtenue par pesée et correspond au rapport du poids relatif des particules retenues par le filtre, sur le poids total des particules émises.

La classification des filtres du groupe F (opacimétrique) est déterminée par comptage particulaire. L'efficacité moyenne ( $E_m$ ) est mesurée pour les particules de  $0,4 \mu\text{m}$  d'un aérosol de DEHS (Di-ethyl-hexyl-sébacate) jusqu'au colmatage du filtre, soit une pression différentielle de 450 Pa.

**Tableau 6 : Classification des filtres de moyenne et haute efficacité selon la norme NF EN 779, (2003)**

Classe des filtres	Perte de charge finale (Pa)	$A_m$ (Poussières synthétiques) %	$E_m$ (Particules de $0,4 \mu\text{m}$ ) %
G1	250	$50 \leq A_m < 65$	-
G2	250	$65 \leq A_m < 80$	-
G3	250	$80 \leq A_m < 90$	-
G4	250	$90 \leq A_m$	-
F5	450	-	$40 \leq E_m < 60$
F6	450	-	$60 \leq E_m < 80$
F7	450	-	$80 \leq E_m < 90$
F8	450	-	$90 \leq E_m < 95$
F9	450	-	$95 \leq E_m$

### 1.2 Filtres à Très Haute Efficacité (THE)

Les filtres des groupes H ou HEPA (High Efficiency Particulate Air) et U ou ULPA (Ultra Low Penetrating Air) constituent la famille des filtres dits de très haute efficacité (THE). L'appartenance d'un filtre à l'un ou l'autre de ces groupes, comme sa classification de H10 à H14 ou de U15 à U17, est définie par la norme EN 1822. Elle est déterminée à partir de la mesure des efficacités locale (pour les filtres de classe H13 et supérieure) et globale du filtre sur les particules les plus pénétrantes (ou M.P.P.S. : Most Penetrating Particule Size) d'un aérosol test (DEHS, huile de paraffine, etc.).

Le diamètre des particules les plus pénétrantes, généralement compris entre  $0,1$  et  $0,2 \mu\text{m}$  au débit nominal d'utilisation des filtres, varie d'un filtre à l'autre, c'est pourquoi les efficacités des produits sont exprimées en fonction de la M.P.P.S.

**Tableau 7 : Classification des filtres de très haute efficacité selon la norme EN 1822-1, (1998)**

Classe du filtre	Efficacité globale <sup>(1)</sup> / MPPS <sup>(2)</sup>	Efficacité locale <sup>(3)</sup> / MPPS
H10	85 %	
H11	95 %	
H12	99,5 %	
H13	99,95 %	99,75 %
H14	99,995 %	99,975 %
U15	99,9995 %	99,9975 %
U16	99,99995 %	99,99975 %
U17	99,999995 %	99,9999 %

<sup>(1)</sup> Efficacité globale : efficacité moyennée sur l'ensemble de la surface frontale de passage d'un élément filtrant, dans des conditions données de fonctionnement du filtre (correspond au rendement R du filtre).

<sup>(2)</sup> MPPS : dimension de la particule pour laquelle le minimum d'efficacité spectrale se produit.

<sup>(3)</sup> Efficacité locale : efficacité en un point spécifique de l'élément filtrant, dans des conditions données de fonctionnement du filtre.

## 2. Ionisation de l'air

Les vertus bénéfiques (effets physiologiques et psychophysiologiques) des ions négatifs ont très souvent été avancées. Cependant, les bienfaits de ces ions restent, à ce jour, difficiles à objectiver.

S'agissant de la dépollution de l'air, les ions produits dans les espaces clos interagissent avec les aérosols. Les particules sont ainsi chargées ce qui a pour effet d'accroître le dépôt des particules sur les surfaces.

Les dispositifs émetteurs d'ions dans l'air ou aéro-ioniseurs reposent entre autre sur : les réacteurs à faisceaux d'électrons, les décharges radiofréquences micro-ondes, les décharges glissantes de type Glidarc, les décharges à effet couronne et à barrière diélectrique (DBD), ces deux dernières technologies étant les plus usitées.

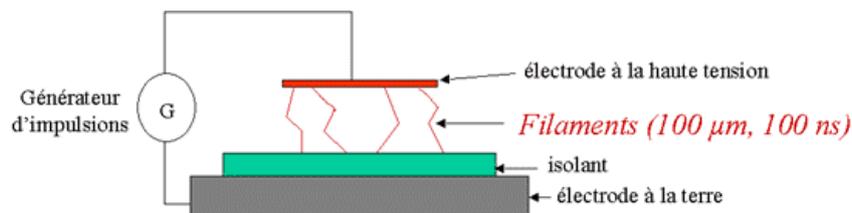
### 2.1 Principales technologies utilisées pour produire des ions

#### 2.1.1 Décharge à effet couronne

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz séparant deux électrodes portées à un haut potentiel. Cette conductivité résulte de l'ionisation des molécules provoquée initialement par l'accélération des électrons par le champ électrique créé. Si ce dernier est suffisamment intense, l'énergie acquise par les électrons va leur permettre d'ioniser les molécules neutres par impact électronique (ionisation par choc). Ce phénomène va conduire à l'apparition de nouveaux électrons libres, qui, soumis au même champ électrique vont pouvoir, à leur tour, ioniser les molécules neutres rencontrées. Le processus prend une allure d'avalanche, dite *avalanche de Townsend* (Gary, 1974).

Une décharge à barrière diélectrique (DBD) est obtenue en appliquant une impulsion de

haute tension aux bornes de deux électrodes dont l'une est recouverte d'un matériau diélectrique (isolant). Le principal rôle de ce diélectrique est d'éviter le passage à l'arc. Le claquage du gaz, entre les électrodes, consiste alors en la propagation locale de fronts d'ionisation, couramment appelés "streamer" (traînée ionisée) qui conduit à l'établissement de filaments de plasma. Le diamètre de ces filaments est de quelques centaines de micromètres et leur durée de vie ne dépasse pas la centaine de nanosecondes (Laboratoire de physique des gaz et des plasmas, 2007).



**Figure 9 : Schéma de principe d'un générateur d'ions par décharges à barrière diélectrique, Laboratoire de physique des gaz et des plasmas, 2007**

### 2.1.2 Nature et devenir des ions négatifs dans les environnements intérieurs

La composition chimique des ions négatifs dépend de leur durée de vie, de l'ordre de 100 secondes selon Parts et Luts, 2004, de la composition de l'air. D'après Goldstein et *al.*, 1992 et Kosenko et *al.*, 1997, les ioniseurs produisent majoritairement l'ion superoxyde  $O_2^-$ , qui par ailleurs, est l'espèce la plus stable des produits primaires générés par ces systèmes.

Les ions migrent dans l'environnement intérieur en fonction des lignes de force du champ électromagnétique existant entre l'électrode émissive et les objets environnants (Gilet et *al.*, 1992) Selon les travaux de Wu et *al.*, 2006b, la distance à la source et l'humidité relative auraient des conséquences notables sur la concentration et la stabilité des ions négatifs. Ainsi, la concentration en ions a été mesurée dans un environnement expérimental (chambre d'étude de  $9 \times 5,7 \times 3,3$  m) avec un ioniseur à haut voltage (30 kV) placé à 1,50 m du sol, à différentes humidités relatives. Les auteurs ont observé une décroissance marquée des ions en s'éloignant de la source. Ainsi, pour une production de  $2.2 \cdot 10^6$  ions. $cm^{-3}$ , un résiduel de 100 à 1000 ions. $cm^{-3}$  a été mesuré à moins d'une mètre de la source (90 cm) à des humidités relatives respectivement de 38 et 74% (25°C). Selon les auteurs, ce résultat serait dû à la stabilité des ions hydratés.

### 2.1.3 Produits secondaires

Lors de la production d'ions, de nombreux composés, dont principalement l'ozone, le monoxyde et dioxyde d'azote ainsi que le peroxyde d'hydrogène, peuvent être générés.

Niu et *al.*, 2001 ont étudié l'efficacité physique, ainsi que la production d'ozone de différents ioniseurs du commerce. Le flux maximal d'ozone observé dans le cadre de cette étude était de  $2757 \mu g \cdot h^{-1}$ , ce qui correspond à une concentration de  $110 \mu g \cdot m^{-3}$  pour un fonctionnement d'une heure, dans un volume de  $25 m^3$  non ventilé (selon OMS ligne directrice pour l'ozone, la moyenne journalière maximum est de  $100 \mu g/m^3$ ).

Wu et Lee en 2004 remarquent qu'au-delà d'un certain seuil, l'augmentation de la tension électrique engendre une production accrue, non seulement d'ozone, mais également de monoxyde et dioxyde d'azote (Wu et Lee, 2004). Afin de limiter la formation de ces produits indésirables, les constructeurs s'orientent vers des dispositifs comportant de nombreuses pointes (source des ions) permettant de réduire les tensions tout en conservant une

production élevée en ions.

**Tableau 8 : Concentration en ozone, en monoxyde et en dioxyde d'azote au sortir d'un générateur d'ions négatifs en fonction de différents voltages appliqués durant 1 heure, (Wu et Lee, 2004)**

Tension (kV)	O <sub>3</sub> (ppb)	NO (ppb)	NO <sub>2</sub> (ppb)
7, 10, 15, 16	nd	nd	nd
17	64,5	9,2	107
20	163	10,6	114
25	358	9,9	124
30	504	13,1	137

Concernant les émissions de peroxyde d'hydrogène, Richardson et *al.*, 2003 ont analysé, la production d'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> d'un ioniseur à effet couronne (tension de -7.5 kV, production de 15.10<sup>3</sup> ions.cm<sup>-3</sup>). Les résultats montrent une production accrue de peroxyde d'hydrogène dans les environnements humides avec une concentration de 936 µg.l<sup>-1</sup> après 30 minutes de fonctionnement pour une humidité relative de 96%.

**Tableau 9 : Concentrations de peroxyde d'hydrogène obtenues pour différentes tensions électriques et humidités relatives avec un ioniseur à effet couronne, d'après Richardson et al., 2003**

Conditions	Tension électrique (-kV)	Concentration en ions négatifs (cm <sup>-3</sup> )	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (µg.l <sup>-1</sup> )
Air sec (~10%)	6	5000	Sous le seuil de détection
	7,5	21000	Sous le seuil de détection
Air des environnements intérieurs (~40%)	6	5000	Traces
	7,5	21000	0,46
Air humide (~96%)	6	1500	Traces
	7,5	15000	936

#### 2.1.4 Dépôt des aérosols

L'impact de l'ionisation sur le dépôt des aérosols dans les espaces clos dépend notamment de la nature des surfaces, de la taille des particules, de la concentration en ions et des conditions de ventilation.

En 2006, Wu étudie le dépôt particulaire sur 5 surfaces avec et sans ionisation (Wu et *al.*, 2006a). L'auteur utilise l'Effective Cleaning Rate ECR définie par Offermann et *al.*, 1985

comme étant la différence des coefficients de décroissance de la concentration particulaire avec et sans ionisation, multipliée par le volume de l'enceinte expérimentale (Tableau 10). Les résultats indiquent que les propriétés électriques (conductivité) ainsi que la rugosité des surfaces auraient une influence sur le dépôt particulaire. Cependant, la rugosité des matériaux affecterait également la fixation des particules. C'est le cas du ciment peint pour les aérosols de NaCl testés de 30 et 300 nm.

**Tableau 10 : Effective Cleaning Rate obtenu pour divers matériaux, lors d'un traitement par ionisation, pour un aérosol monodispersé de NaCl de 30 et 300 nm**

Matériaux constituant les surfaces	ECR (l.min <sup>-1</sup> )	
	30 nm	300 nm
Bois	41,4 ± 1,8	34,6 ± 1,6
PVC	30,4 ± 1,1	33,3 ± 1,3
Ciment peint	30,3 ± 2,0	14,8 ± 1,2
Papier peint	27,7 ± 1,7	27,0 ± 1,7
Acier inoxydable	20,1 ± 1,5	16,6 ± 1,1

Conductivité électrique (Ω.m-1) :

Bois (1,24×10<sup>-15</sup>) < PVC (2,38×10<sup>-15</sup>) < Papier peint (4,17×10<sup>-15</sup>) < Ciment peint (2,54×10<sup>-9</sup>) << Acier inoxydable (1.4×10<sup>6</sup>).

Rugosité des matériaux :

Ciment peint > Bois ≈ Papier peint ≈ PVC > Acier inoxydable, D'après Wu et al., (2006a)

Mayya et al., 2004 ont étudié, à l'aide d'outils numériques, l'influence de la taille des particules sur l'efficacité d'un dispositif d'ionisation, dans un environnement intérieur. Selon le modèle développé, la relation existant entre l'efficacité de traitement des aérosols par l'ionisation et la taille des particules n'est pas linéaire. D'après les auteurs, l'hypothèse d'homogénéité utilisée dans le modèle conduirait à une surestimation du facteur de réduction de la concentration (CRF) par rapport aux résultats expérimentaux de Grabarczyk (2001). Cependant, l'allure générale des courbes expérimentale et théorique est similaire, le maximum d'efficacité étant obtenu respectivement pour des particules de diamètre égal à 200 et 300 nm.

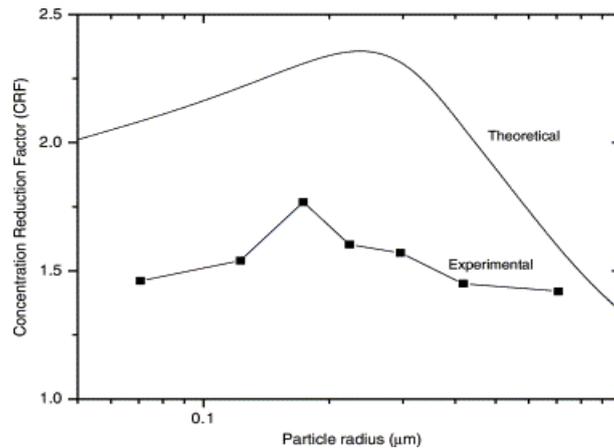


Figure 10 : Courbes expérimentales et théoriques présentant la réduction de la concentration particulaire ( $CRF = C_0/C_\infty$ , avec  $C_0$  et  $C_\infty$ , respectivement la concentration initiale et finale en condition stationnaire) en fonction de la taille des particules

Approche numérique : volume non ventilé de  $80 \text{ m}^3$ , ioniseur par décharge à effet couronne à un courant de  $0,5 \mu\text{A}$  d'après les travaux de Mayya et al., 2004

Approche expérimentale : volume non ventilé  $3.5 \times 4.6 \times 3.1 \text{ m}^3$ , diamètre des particules :  $0,35, 045$  et  $0,6 \mu\text{m}$  à  $2\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , ioniseur par décharge à effet couronne à un courant de  $6,5 \mu\text{A}$  d'après Grabarczyk (2001).

L'efficacité peut, toutefois, être affectée par divers paramètres de l'environnement intérieur tels que les conditions de ventilation et d'ionisation. Ainsi les résultats de Mayya et al., 2004 concernant l'influence de ces facteurs sur l'efficacité de l'ionisation ont d'une part confirmé une augmentation de l'efficacité du dépôt particulaire lorsque la concentration en ions dans l'environnement intérieur augmente et d'autre part mis en évidence que la mise en œuvre d'une ventilation réduirait l'efficacité de l'ionisation (ainsi le CRF diminuerait de 90% pour un renouvellement d'air de  $0,5 \text{ h}^{-1}$ ).

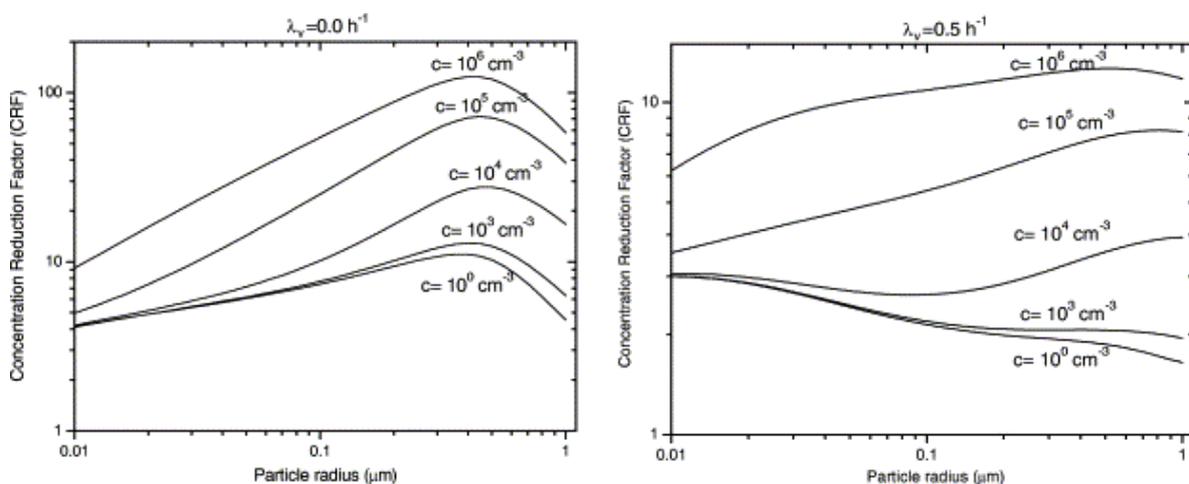


Figure 11 : Variation du facteur de réduction de la concentration (CRF), dans des conditions stationnaires à la source, en fonction de la taille des particules ( $\mu\text{m}$ ), les conditions de ventilation (à gauche : non ventilé et à droite : renouvellement d'air de  $0,5 \text{ h}^{-1}$ ) et la concentration en ions (de 0 à  $10^6 \text{ ions}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), d'après Mayya et al., 2004

### 3. Photolyse

La photolyse est définie comme toute réaction chimique dans laquelle une molécule est décomposée par la lumière. Les radiations ultraviolettes, les ondes radio, les micro-ondes, les infrarouges, la lumière visible, les rayons X et les radiations  $\gamma$  couvrent chacune une région du spectre électromagnétique. La longueur d'onde des radiations est le paramètre caractérisant leurs propriétés. Les rayonnements UV s'étendent approximativement de 400 à 100 nm avec les subdivisions définies durant le congrès international sur la lumière de 1932 : UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm) et UV-C (280-100 nm), (Diffey, 2002).

Les rayonnements ultraviolets détériorent les molécules biologiques constitutives des microorganismes selon :

- un mécanisme d'altération directe notamment par les radiations UV-C qui interagissent fortement avec les acides nucléiques composant le matériel génétique et plus faiblement avec les protéines dont le maximum d'absorption se situe entre 240 et 300 nm ;
- une action indirecte liée à la formation d'espèces radicalaires hautement réactives qui dénaturent le matériel biologique des microorganismes (Harm, 1980).

Formalisé par Kethley et Branch, 1972, la sensibilité des microorganismes aux rayonnements peut s'exprimer selon une constante  $Z$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{J}^{-1}$ ). Celle-ci se détermine expérimentalement en exposant les microorganismes à des doses connues de rayonnements ultraviolets ( $E_{\text{eff}} \times t$ ) et en estimant leur taux de survie (Noakes et al., 2004)

Cette constante de sensibilité aux UV,  $Z$  est calculée selon l'équation :

$$Z = - \frac{\ln(N_t / N_0)}{E_{\text{eff}} \times t}$$

Avec,

$N_t$  : Nombre de microorganismes au temps  $t$ ,

$N_0$  : Nombre de microorganismes à  $t=0$ ,

$E_{\text{eff}}$  : Intensité moyenne en UV (en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ),

$t$  : Durée d'exposition aux radiations (en seconde).

Ainsi pour des conditions d'exposition similaires (durée, intensité, HR, T°C), plus  $Z$  sera important et plus l'aérosol biologique sera sensible aux rayonnements.

Tableau 11 : Constantes de sensibilité aux radiations ultraviolettes UV-C

Microorganisme	Constante de sensibilité Z (cm <sup>2</sup> .μJ <sup>-1</sup> )	Référencés par Kowalski et al., 2000	Résistance aux rayonnements
<i>Bacillus anthracis</i> (forme sporulée)	0,000031	Knudson, 1986	▼ +
<i>Penicillium digitatum</i> (conidies)	0,000072	Asthana, 1992	
<b>Influenza A (ARN, enveloppé)</b>	0,001187	Jensen, 1964	
<i>Vaccinia</i> (ADN double brin, enveloppé)	0,001528	Jensen, 1964	
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0,002375	Collins, 1971	-

Concernant les virus, la taille de leur ADN ou ARN influencerait l'impact des rayonnements ultraviolets avec une plus grande probabilité d'être endommagés pour les génomes de taille importante (Lytle et Sagripanti, 2005). La nature du matériel génétique (ADN ou ARN) modifierait également leur sensibilité. Les virus à ADN seraient moins résistants aux rayonnements, les photoproduits de dimère pyrimidique et notamment le dimère de thymine étant produit uniquement à partir de l'ADN (Rauth, 1965).

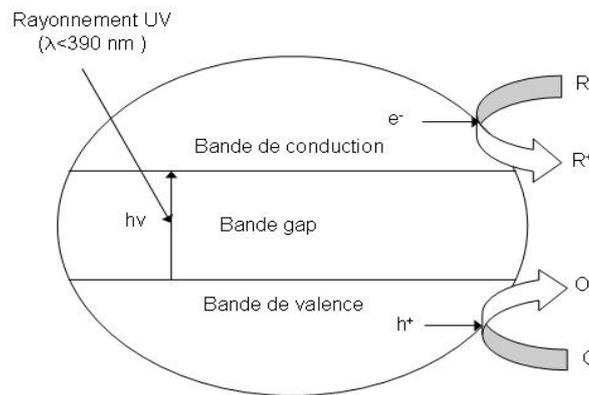
Des essais menés par Jakab et Knight, 1982 relatifs à l'influence de la dose d'UV sur la virulence d'un aérosol viral (*Influenza A/PR8/34*) ont mis en évidence que le pourcentage de mortalité de souris soumises à l'aérosol viral est d'autant plus faible que la dose d'irradiation de l'aérosol est importante.

Concernant les effets de l'humidité relative sur la sensibilité des aérosols bactériens, les études de Ko et al., (2000) ; Peccia et al., (2000) ; Lai et al., (2004) tendent à montrer que plus l'humidité relative est faible, plus les aérosols microbiologiques sont sensibles aux radiations ultraviolettes.

#### 4. Photocatalyse

Historiquement, la photocatalyse fût appliquée aux traitements des polluants chimiques dans les effluents aqueux. Les applications s'étendirent rapidement aux polluants microbiologiques, suite notamment aux travaux de Matsunaga et al., 1985 qui mirent en évidence l'action bactéricide de ce procédé sur *Escherichia coli*.

Par définition, il s'agit d'un processus catalytique hétérogène se produisant exclusivement à la surface d'un catalyseur. Un semi-conducteur, tel le TiO<sub>2</sub>, est activé sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique de longueurs d'onde s'étendant de la lumière visible (~500 nm) jusqu'aux ultraviolets (~250 nm) selon l'énergie du gap du semi-conducteur. Ainsi, lorsque l'énergie fournie par le rayonnement est suffisante, l'électron de la bande de valence se déplace vers la bande de conduction formant ainsi un dipôle électronique (électron/trou électronique). L'électron (e<sup>-</sup>) et le trou électronique (h<sup>+</sup>) réagissent avec les composés gazeux, tels que l'oxygène (O<sub>2</sub>) et la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) adsorbés à la surface du semi-conducteur. Ces réactions conduisent à la formation de radicaux hydroxyles et d'ions superoxydes. Ces espèces chimiques, très réactives, oxydent alors les composés organiques adsorbés à la surface du catalyseur. La réaction photocatalytique complète conduit à la production de dioxyde de carbone et d'eau.



**Figure 12 : Représentation schématique du processus de photo-excitation du dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) par un rayonnement UV (R=Réduction et O=Oxydation)**

## 5. Plasma froid

Un gaz plasma est un gaz ionisé, en état de non équilibre thermodynamique, constitué d'ions, de radicaux libres et de molécules neutres.

Pratiquement, l'application d'un champ électrique par exemple à un gaz plasmagène confiné dans une enceinte en général sous vide partiel, crée le déplacement d'électrons qui vont entrer en collision avec les molécules du gaz. Les molécules à l'état excité reviennent à un état stable par l'émission d'un photon ou par collision avec une autre molécule Moisan et al., (2001) induisant la création de radicaux libres et d'ions. La fréquence des photons émis dépend de la composition du gaz plasmagène et peut correspondre à la fréquence des UV.

Les rayonnements ultraviolets et la production d'espèces réactives (atomes ou radicaux) des plasmas froids jouent un rôle fondamental dans le processus de stérilisation. L'inactivation des microorganismes par les plasmas implique trois mécanismes selon Moisan et al., 2001 :

- altération directe du matériel génétique par le rayonnement UV,
- érosion atome par atome par désorption intrinsèque (le rayonnement UV entraîne la formation de composés volatiles à partir des molécules constituant des microorganismes),
- érosion atome par atome par combustion lente liée aux atomes d'oxygène aux radicaux produits par le plasma.

Selon Laroussi et Leipold, 2004, les radicaux, l'ozone et les rayonnements ultra-violettes interviendraient également dans l'inactivation des microorganismes. Selon ces auteurs, les espèces réactives tels que l'oxygène atomique (O<sup>•</sup>), l'ozone (O<sub>3</sub>) et les radicaux hydroxyles (OH<sup>•</sup>), NO et NO<sub>2</sub> joueraient un rôle crucial dans l'inactivation des microorganismes.

Sharma et al., 2005 présentent des résultats sur l'inactivation par plasma de cultures de deux bactéries sous forme végétative : *E. coli*, *B. atrophaeus* ; et sporulée de *B. atrophaeus*. Les résultats indiquent respectivement une diminution de 5 lg et 1 lg en 1 seconde. Les spores sont, quant à elles, réduites de 3 lg au terme d'une exposition de 10 minutes.

## Annexe 4 : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine

### RAPPEL DES RUBRIQUES DE LA DECLARATION PUBLIQUE D'INTERETS

<b>IP-A</b>	Interventions ponctuelles : autres
<b>IP-AC</b>	Interventions ponctuelles : activités de conseil
<b>IP-CC</b>	Interventions ponctuelles : conférences, colloques, actions de formation
<b>IP-RE</b>	Interventions ponctuelles : rapports d'expertise
<b>IP-SC</b>	Interventions ponctuelles : travaux scientifiques, essais, etc.
<b>LD</b>	Liens durables ou permanents (Contrat de travail, rémunération régulière ...)
<b>PF</b>	Participation financière dans le capital d'une entreprise
<b>SR</b>	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Parents salariés dans des entreprises visées précédemment)
<b>SR-A</b>	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Participation à conseils d'administration, scientifiques d'une firme, société ou organisme professionnel)
<b>VB</b>	Activités donnant lieu à un versement au budget d'un organisme

### SYNTHESE DES DECLARATIONS PUBLIQUES D'INTERETS DES MEMBRES DU CES « MILIEUX AERIENS » PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE

<b>NOM</b>	<b>Prénom</b> <b>Rubrique de la DPI</b> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	<b>Date de déclaration des intérêts</b>
<b>Analyse Afsset :</b>		

<b>ALARY René</b>		16 juin 2006 06 novembre 2006 06 février 2007 27 mars 2008 13 juin 2008
<b>Analyse Afsset:/</b>	Aucun lien déclaré	

<b>ANNESI-MAESANO</b>	<b>Isabella</b>	25 juin 2003 08 novembre 2006 27 novembre 2007
	Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>BLANCHARD</b>	<b>Olivier</b>	19 juin 2006 21 mars 2007 05 février 2008 20 juin 2008
	Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>CABANES</b>	<b>Pierre-André</b>	23 janvier 2006 09 février 2007 23 janvier 2008 27 mars 2008 13 juin 2008
	<b>LD</b> Rédacteur en chef de la revue « Environnement, risques et Santé » aux Editions John Libbey (emploi complémentaire)	
<b>Analyse Afsset:</b>	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.	
<b>CAMPAGNA</b>	<b>Dave</b>	21 novembre 2005 08 novembre 2006 13 décembre 2006 03 décembre 2007 27 mars 2008 12 juin 2008
	<b>LD</b> Epidémiologiste à la RATP	
<b>Analyse Afsset :</b>	Les transports en commun n'entrent pas dans le cadre de la saisine. Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.	
<b>DELMAS</b>	<b>Véronique</b>	02 février 2003 22 juin 2006 22 mars 2007 05 février 2008
	Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>ELICHEGARAY</b>	<b>Christian</b>	19 juin 2006 21 mars 2007 05 février 2008 23 juin 2008
<b>Analyse Afsset :</b>	Aucun lien déclaré	

<p><b>EZRATTY Véronique</b></p> <p>En tant que médecin dans le service des études médicales d'EDF, responsable, notamment, des dossiers « qualité de l'air intérieur » et « bâtiments et santé ».</p> <p><b>IP-SC</b></p> <p>Rédacteur de l'article « Virus influenza pandémique à l'intérieur des bâtiments : quel risque de transmission par les systèmes de ventilation ou de climatisation » pour la revue « Environnement, risques et Santé » aux Editions John Libbey.</p> <p>Article publié dans le cadre de ses fonctions chez EDF. Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p> <p><b>Analyse Afsset :</b></p>		<p>21 novembre 2006 10 octobre 2007 13 juin 2008</p>
<p><b>GARNIER Robert</b></p> <p><b>Démission le 6 avril 2009</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset:/</b></p>		<p>20 octobre 2005 12 octobre 2006 20 février 2008 12 juin 2008 29 janvier 2009</p>
<p><b>GLORENNEC Philippe</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset:/</b></p>		<p>08 novembre 2005 23 novembre 2006 03 décembre 2007 27 mars 2008 16 juin 2008</p>
<p><b>KIRCHNER Séverine</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset:/</b></p>		<p>17 juin 2003 27 mars 2008</p>
<p><b>LEFRANC Agnès</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset:/</b></p>		<p>27 décembre 2006 10 octobre 2007 05 février 2008 12 juin 2008</p>

<b>MILLET Maurice</b>	25 octobre 2005 06 novembre 2006 21 mars 2007 07 décembre 2007 27 mars 2008 17 septembre 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>MORCHEOINE Alain</b>	17 juillet 2003 27 mars 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>MOREL Yannick</b>	17 juillet 2003 12 février 2007 27 mars 2008 23 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>MORIN Jean-Paul</b>	13 juin 2006 26 février 2007 27 novembre 2007 27 mars 2008 19 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>PARIS Christophe</b>	09 janvier 2006 27 mars 2008 20 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>PEUCH Vincent-Henri</b>	24 octobre 2005 11 février 2007 29 novembre 2007 13 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>POINSOT Charles</b>	18 juin 2006 30 mai 2008 12 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	

<p><b>RAMEL Martine</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset:/</b></p>	<p><b>Martine</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p>	<p>24 juin 2003 05 février 2008</p>
<p><b>SLAMA Rémy</b></p> <p><i>Démission le 12 janvier 2009</i></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset:/</b></p>	<p><b>Rémy</b></p> <p><i>Démission le 12 janvier 2009</i></p> <p>Aucun lien déclaré</p>	<p>06 novembre 2006 10 octobre 2007 12 juin 2008</p>
<p><b>SQUINAZI Fabien</b></p> <p><b>IP-SC</b></p> <p>Corédacteur de l'article « Virus influenza pandémique à l'intérieur des bâtiments : quel risque de transmission par les systèmes de ventilation ou de climatisation », paru dans la revue « Environnement, risques et Santé » aux Editions John Libbey</p> <p><b>Analyse Afsset:</b> Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.</p>	<p><b>Fabien</b></p> <p><b>IP-SC</b></p> <p>Corédacteur de l'article « Virus influenza pandémique à l'intérieur des bâtiments : quel risque de transmission par les systèmes de ventilation ou de climatisation », paru dans la revue « Environnement, risques et Santé » aux Editions John Libbey</p>	<p>03 novembre 2006 10 octobre 2007</p>
<p><b>VENDEL Jacques</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p> <p><b>Analyse Afsset:/</b></p>	<p><b>Jacques</b></p> <p>Aucun lien déclaré</p>	<p>1<sup>er</sup> juillet 2005 14 novembre 2006 10 octobre 2007 11 décembre 2007</p>

**SYNTHESE DES DECLARATIONS PUBLIQUES D'INTERETS DES MEMBRES DU CES « EAUX ET AGENTS BIOLOGIQUES » PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE**

<b>NOM</b>	<b>Prénom</b> <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	<b>Date de déclaration des intérêts</b>
<b>Analyse Afsset :</b>		
<b>ABSI</b>	<b>Rafik</b>  Aucun lien déclaré	19 janvier 2007 04 mai 2007 21 juin 2007 09 juillet 2008
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>BALLET</b>	<b>Jean-Jacques</b>  Aucun lien déclaré	22 janvier 2007 04 mai 2007 20 juin 2007
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>BERJEAUD</b>	<b>Jean-Marc</b>  <b>VB</b>	07 novembre 2006 04 mai 2007 09 juin 2008
<b>Analyse Afsset :</b>	Co-directeur de thèse sur une bactériocine anti-légionelle (bourse CIFRE/Veolia) Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.	
<b>BOUDENNE</b>	<b>Jean-Luc</b>  Aucun lien déclaré	27 octobre 2006 04 mai 2007 13 juin 2008 19 octobre 2008
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>BRUGERE-PICOUX</b>	<b>Jeanne</b>  Aucun lien déclaré	14 décembre 2006 04 juillet 2007
<b>Analyse Afsset:/</b>		

<b>CABILLIC Pierre-Jean</b>	09 novembre 2006 04 mai 2007 25 juin 2007 15 novembre 2008
Aucun lien déclaré <b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>CAMUS Patrick</b>	15 février 2006 04 mai 2007 20 juin 2008 15 novembre 2008
Aucun lien déclaré <b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>CREPPY Edmond</b>	18 janvier 2007 04 mai 2007 14 octobre 2008
Aucun lien déclaré <b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>CUDENNEC Christophe</b>	12 décembre 2006 04 mai 2007 20 mai 2008 16 octobre 2008
Aucun lien déclaré <b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>DAGOT Christophe</b>	09 novembre 2006 03 juillet 2007 15 octobre 2008
Aucun lien déclaré <b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>DUKAN Sam</b>	30 octobre 2006 03 juillet 2007 30 novembre 2008
Aucun lien déclaré <b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>GEHANNO Jean-François</b>	21 novembre 2006 04 mai 2007 16 juin 2008
Aucun lien déclaré <b>Analyse Afsset:/</b>	

<b>GILLI</b>	<b>Éric</b>	13 décembre 2006 02 juillet 2007
Aucun lien déclaré		
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>GUT</b>	<b>Jean-Pierre</b>	28 novembre 2006 04 mai 2007 06 juin 2008
Aucun lien déclaré		
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>HILAIRE</b>	<b>Didier</b>	15 décembre 2006 04 mai 2007
<b>SR-A</b>		
Membre du groupe « décontamination » de l'OTAN depuis 1995.		
<b>Analyse Afsset :</b>	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.	
<b>HUMBERT</b>	<b>Jean-François</b>	10 juillet 2006 04 mai 2007 10 juillet 2007
Aucun lien déclaré		
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>LAKEL</b>	<b>Abdel</b>	22 janvier 2007 04 mai 2007 22 octobre 2008 30 novembre 2008
Aucun lien déclaré		
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>LE BACLE</b>	<b>Colette</b>	16 janvier 2007 04 mai 2007
Aucun lien déclaré		
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>LEDRU</b>	<b>Éric</b>	08 janvier 2007 04 mai 2007
<b>Démission le 12 février 2009</b>		
Aucun lien déclaré		
<b>Analyse Afsset:/</b>		

<b>MARCHANDISE</b>	<b>Patrick</b>	27 novembre 2006 04 mai 2007 17 octobre 2008
	Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>MATHIEU</b>	<b>Laurence</b>	11 décembre 2006 03 juillet 2007 08 juillet 2008
	<b>VB</b>	
	Participation au programme de recherche « Caractérisation de l'exposition aux aérosols de légionnelles » financé par Ademe, Afsset, Veolia, DGS et EDF.	
<b>Analyse Afsset :</b>	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.	
<b>MOGUEDET</b>	<b>Gérard</b>	17 janvier 2007 1 <sup>er</sup> octobre 2007
	Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>MORIN</b>	<b>Anne</b>	17 janvier 2007 04 mai 2007
	<b>Démission le 20 février 2009</b>	
	Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>MOUNEYRAC</b>	<b>Catherine</b>	03 janvier 2007 04 mai 2007 13 juin 2008 12 février 2009
	Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>OCCHIALINI-CANTET</b>	<b>Alessandra</b>	08 décembre 2006 04 mai 2007 19 juillet 2007
	<b>Démission le 4 mars 2009</b>	
	Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>		

<b>POURCHER Anne-Marie</b>	28 novembre 2006 03 juillet 2007 18 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>RAUZY Sylvie</b>	19 janvier 2007 04 mai 2007 10 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>RUNIGO-MAGIS Renée</b>	16 janvier 2007 03 juillet 2007 13 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>SAUVANT-ROCHAT Marie-Pierre</b>	30 novembre 2006 04 mai 2007 11 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>TANDEAU DE MARSAC Nicole</b>	14 novembre 2006 03 juillet 2007
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>TREMBLAY Michèle</b>	16 novembre 2006 04 juillet 2007 16 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>TRIBOLLET Bernard</b>	15 novembre 2006 04 mai 2007 20septembre 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	
<b>VILLENA Isabelle</b>	08 novembre 2006 04 mai 2007 10 juin 2008
Aucun lien déclaré	
<b>Analyse Afsset:/</b>	

**SYNTHESE DES DECLARATIONS PUBLIQUES D'INTERETS DES MEMBRES DU GT PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE**

<b>NOM</b>  <b>Analyse Afsset :</b>	<b>Prénom</b> <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt	<b>Date de déclaration des intérêts</b>
<b>ABSI</b>  <b>Analyse Afsset:/</b>	<b>Rafik</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques »)  <i>Intégré au GT le 22 mai 2007</i>  Aucun lien déclaré	19 janvier 2007 04 mai 2007 21 juin 2007 09 juillet 2008
<b>ADER</b>  <b>Analyse Afsset:/</b>	<b>Florence</b>  Aucun lien déclaré	10 avril 2005 15 février 2007  <i>Démission le 1<sup>er</sup> septembre 2008</i>
<b>BALTY</b>  <b>Analyse Afsset:/</b>	<b>Isabelle</b>  Aucun lien déclaré	1 <sup>er</sup> février 2007 16 juillet 2008
<b>BRUGERE-PICOUX</b>  <b>Analyse Afsset:/</b>	<b>Jeanne</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques »)  Aucun lien déclaré	14 décembre 2006 04 juillet 2007
<b>CABANES</b>  <b>Analyse Afsset:</b>	<b>Pierre-André</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »)  <b>LD</b>  Rédacteur en chef de la revue « Environnement, risques et Santé » aux Editions John Libbey (emploi complémentaire)  Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.	23 janvier 2006 09 février 2007

<b>GEHANNO</b>	<b>Jean-François</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques »)	21 novembre 2006 04 mai 2007 16 juin 2008
<i><b>Intégré au GT le 22 mai 2007</b></i>		
Aucun lien déclaré		
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>GUT</b>	<b>Jean-Pierre</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques »)	28 novembre 2006 04 mai 2007 06 juin 2008
Aucun lien déclaré		
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>MOREL</b>	<b>Yannick</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »)	17 juillet 2003 12 février 2007 27 mars 2008 23 juin 2008
Aucun lien déclaré		
<b>Analyse Afsset:/</b>		
<b>RUNIGO-MAGIS</b>	<b>Renée</b> (membre du CES « Évaluation des risques liés aux eaux et aux agents biologiques »)	16 janvier 2007 03 juillet 2007 13 juin 2008
<i><b>Intégrée au GT le 22 mai 2007</b></i>		
Aucun lien déclaré		
<b>Analyse Afsset:/</b>		

#### **ORGANISME-EXPERT PARTICIPANT**

Le CSTB, représenté par Jacques RIBERON et Enric ROBINE, a signé une attestation, le 26 mars 2007, garantissant l'absence de liens de nature à présenter un conflit d'intérêt avec le champ de la saisine.

## Notes

---

