



Ventilation naturelle ou mécanique

Influence du système et des débits d'air neuf sur le risque de contamination par le SARS CoV 2

02/2021

Diaz Carrasquer, Albert J

Ingénieur CFD - Laboratoire d'Aérodynamique et d'Acoustique
S&P Research SLU
Soler & Palau Ventilation Group

Lanuz Fabregat, Jordi

Ingénieur CFD - Laboratoire d'Aérodynamique et d'Acoustique
S&P Research SLU
Soler & Palau Ventilation Group

1. Résumé

Depuis le début de la pandémie mondiale de la COVID-19, il existe un consensus international concernant les mesures pour réduire la transmission du virus : distanciation sociale, hygiène des mains et port du masque. Ces mesures sont la conséquence des voies de contamination acceptées : contamination par inhalation de gouttelettes et par contact direct avec des surfaces contaminées. Toutefois, il existe un nombre croissant de scénarios de contamination où la transmission ne peut s'expliquer par les mécanismes mentionnés précédemment mais via la transmission par aérosols. En ce sens, les différentes autorités sanitaires ont commencé à accepter ladite contamination comme une voie de transmission plus probable - comme le fait apparaître la bibliographie la plus récente. La ventilation a, par conséquent, été incluse comme mesure fondamentale de réduction de la transmission. Ce fait a introduit dans la société un débat intense quant au caractère opportun de la ventilation naturelle ou de la ventilation mécanique. La ventilation naturelle (considérée dans cette étude comme les fenêtres ouvertes) présente l'apparent avantage d'un supposé coût nul, au détriment de l'impact sur l'efficacité énergétique (et l'omission des engagements internationaux de lutte contre le changement climatique), le confort thermique des personnes, la présence élevée de contaminants dans l'air dans les environnements urbains et l'absence de contrôle de son fonctionnement réel.

En dépit de cela, la présente étude se concentre sur la comparaison des deux types de ventilation uniquement quant à leur efficacité dans la réduction de la probabilité de contamination par aérosols. Concernant la ventilation naturelle, on simule le débit de renouvellement généré en ouvrant les fenêtres et concernant la ventilation mécanique le débit de renouvellement est celui stipulé par le Règlement pour les Installations Thermiques dans les Bâtiments (RITE - Règlement espagnol). Dans cette étude, on analyse trois scénarios de contamination possibles : une école, un bar/restaurant et un bureau, avec des densités d'occupation et caractéristiques de l'événement (temps d'exposition, débits respiratoires, etc.) similaires à des situations réelles. Pour relier la concentration d'aérosols dans l'atmosphère avec les probabilités d'infection, on emploie le modèle de Wells-Riley. Les débits d'expiration de particules infectieuses (quantum-h-1) sont obtenus de la littérature référencée ci-après. On analyse les concentrations de particules infectieuses ainsi que les probabilités d'infection en fonction des débits de renouvellement pour différents temps d'exposition. Même s'il est sûr que pour obtenir une probabilité d'infection inférieure il faudrait augmenter les débits au-dessus de ce qu'indique le RITE (une réglementation qui n'a pas été élaborée en tenant compte d'un événement de contamination par aérosols), on conclut que le débit de renouvellement associé à la ventilation mécanique respectant le RITE parvient à réduire jusqu'à plus de trois fois le risque d'infection par rapport à la ventilation naturelle (ouverture des fenêtres).

2. Introduction

Le 31 décembre 2019, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a été alertée d'une série de cas de pneumonie virale à Wuhan. Le 9 janvier 2020, on a déterminé que l'épidémie était provoquée par un nouveau coronavirus (SARS-CoV2) [1]. Les premières réunions se sont tenues rapidement pour analyser ce nouveau virus et le 11 jan-

vier 2020 on obtenait sa séquence génétique [1]. Tout d'abord, on a eu des doutes sur la possible transmission du virus entre humains mais on a pu le confirmer le 21 janvier [1]. Cependant, ce n'est que le 11 mars que l'OMS a déclaré le début de la pandémie [1].



L'OMS a suggéré initialement la distanciation sociale, le port de masque et le lavage des mains comme les meilleurs outils pour combattre le virus du fait que le mécanisme considéré par l'OMS comme le mode de transmission du virus [2] était le contact direct des muqueuses du nez, des yeux ou de la bouche avec les gouttes/particules infectées. Ces particules peuvent provenir de :

1. Particules qui sont émises en parlant, en respirant ou en éternuant. Dans ces conditions, la transmission à travers ces gouttes à des distances supérieures à deux mètres paraît peu probable.
2. Surfaces contaminées par ces gouttes qui finissent dans nos muqueuses par contact direct. Dans ce cas, on étudie le temps durant lequel le virus peut survivre sur différents matériaux.

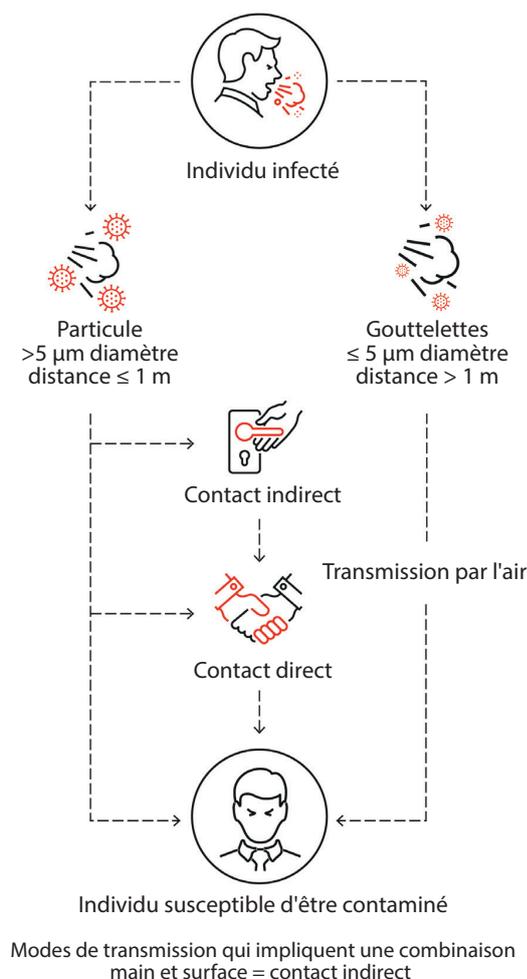


Figure 2.1. Modes de transmission COVID-19 [3]

Par conséquent, tous les Etats ont parié initialement sur ces mesures pour pallier la transmissibilité élevée du virus. Cependant, peu après, de nombreux scientifiques ont commencé à alerter sur la possibilité de la transmission du virus au moyen d'aérosols ([4], [5], [6]). Les aérosols sont des particules plus petites que celles précédemment mentionnées qui ne tombent pas aussi rapidement et continuent de flotter dans l'atmosphère pendant un temps prolongé. Ces aérosols se distribuent rapidement dans les salles et, à l'instar des gouttelettes déjà mentionnées, peuvent également contenir une charge virale. Différentes études ont détecté la présence de SARS-CoV2 dans des aérosols [7]. L'importance de ce mode de transmission apparaît lorsqu'on considère qu'une personne adulte respire en moyenne entre 18 000 et 20 000 fois par jour, en respirant (et en filtrant) quelques 8 000 litres d'air chaque jour, on inhale par conséquent une grande quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère.

L'importance de la transmission par aérosols prend encore plus de relief à partir de l'étude de plusieurs événements ([8], [9] et [10]) dans lesquels les mécanismes de transmission décrits et acceptés par l'OMS ne permettaient pas d'expliquer le nombre élevé de contaminations dérivées desdits événements.

A partir de ce type d'événements, le Professeur José L. Jiménez de l'Université du Colorado a développé un modèle pour estimer la transmission de la COVID-19 par aérosols [5]. Le Professeur Jiménez et de nombreux autres scientifiques ([4], [11], [12]) s'efforcent depuis longtemps de faire prendre conscience aux autorités de l'importance de la transmission du virus par aérosols. L'OMS a finalement inclus les aérosols comme mode de la transmission de la COVID-19 dans des situations spécifiques en octobre dernier [13].

Le propos de cet article n'est pas d'approfondir tous les modes de transmission mais de se concentrer uniquement sur l'importance des aérosols comme mode de transmission que, ni la distanciation sociale ni le lavage des mains, ne peuvent éviter.

Cet article part de l'analyse du modèle exposé en [5] auquel on ajoute de nouvelles fonctionnalités et qu'on implémente dans Python pour obtenir une flexibilité maximale quant aux cas d'étude et à la visualisation des résultats. L'objectif est double : tout d'abord analyser le

risque de contamination si une personne contaminée se trouve dans une salle connue (volume, quantité de renouvellement d'air, nombre de personnes, etc.); ensuite pouvoir dimensionner correctement la ventilation des salles en fonction du type d'événement qu'elles accueillent et de sa durée.

Nous essaierons ainsi de répondre aux questions suivantes : la ventilation naturelle (entendue comme l'ouverture des fenêtres) est-elle suffisante? Ou est-il nécessaire de forcer la ventilation à l'aide d'un système de ventilation? Par ailleurs, est-il suffisant de ventiler en suivant les prescriptions réglementaires en vigueur? A cette fin, nous analyserons trois exemples différents (la salle de classe d'un collège, un petit bar/restaurant et un espace de bureaux).

Le présent travail vise d'un côté à faire prendre conscience à tous les utilisateurs et aux administrations publiques de l'importance d'une bonne ventilation constante : avant, pendant et après une pandémie mondiale et d'un autre côté à confirmer si le cadre réglementaire en vigueur, bien appliqué, est suffisant pour réduire à des niveaux acceptables la possibilité de contamination par aérosols.

3. Analyse des risques

3.1 Introduction au modèle

3.1.1 Concepts clés

Nous décrivons ci-après une série de concepts :

- **Quanta** : doses du pathogène en aérosol dont l'inhalation conduit à une infection avec une probabilité de 63,3%. Discret et présent en très faibles concentrations, analogue à une particule d'aérosol chargée de pathogènes.
- **Taux d'expiration de quanta** : taux auquel une personne infectée émet des quanta dans l'air expiré. Il dépend du groupe d'âge et de l'activité physique [14][15].

- **Débit respiratoire** : c'est le débit d'air qu'une personne inhale et exhale. Il dépend du groupe d'âge et de l'activité physique.
- **Quanta inhalés** : total quanta inhalés par personne compte tenu d'un temps d'exposition en raison de la respiration.
- **Efficacité masque** : efficacité avec laquelle un masque prévient l'inhalation des quanta présents dans l'atmosphère et avec laquelle il prévient la libération de quanta dans l'atmosphère par la personne infectée [16].
- **Probabilité d'infection** : probabilité qu'une personne soit infectée en fonction du total de quanta inhalés.
- **Moyenne temporelle de la concentration de quanta** : pour calculer la probabilité d'infection, le modèle utilise la concentration de quanta équivalent à la présence d'une concentration constante pendant la durée de l'évènement.
- **Probabilité cumulée** : en considérant de multiples répétitions du même évènement ou bien un évènement avec des intervalles non équiprobables, elle correspond à la probabilité de s'infecter durant le premier évènement, combinée à la probabilité d'infection durant le deuxième évènement (conditionnée au fait de ne pas avoir été infecté lors des évènements précédents) et ainsi de suite pour tous les intervalles ou évènements.

3.1.2 Standards de ventilation

Pour répondre à la question : est-il nécessaire de ventiler davantage? On a besoin de savoir ce que prévoit la norme pour les différentes situations qui seront analysées. En Espagne, le règlement qui régit la quantité de renouvellements nécessaires pour garantir la qualité de l'air intérieur est le Règlement pour les Installations Thermiques dans les Bâtiments (RITE) [17].

Le RITE établit des conditions de débit d'air extérieur (renouvellement) pour garantir la qualité de l'air intérieur dans différentes hypothèses (Tableau 1.4.2.1 de [17]).



- Dans le cas d'une salle de classe et d'un espace de bureaux appartenant à la catégorie IDA 2, on établit un débit de renouvellement minimum de $12,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ par personne.
- Dans le cas des bars/restaurants appartenant à la catégorie IDA 3, on établit un débit de renouvellement minimum de $8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $28,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ par personne.

Même s'il est certain que le RITE permet d'augmenter les débits de renouvellement en fonction du taux métabolique des occupants [18], lesdites augmentations n'ont pas été appliquées dans les cas étudiés dans cet article.

3.2 Modèle Analytique

L'outil exposé ici se base sur ce qu'on connaît dans le domaine de la chimie et des sciences atmosphériques comme «One Box Model». Il s'agit d'une modélisation simplifiée de l'équilibre d'une espèce chimique comme si elle se trouvait à l'intérieur d'une enceinte fermée (une «boîte» dans ce cas-là). Le modèle utilisé suppose que l'espèce se distribue uniformément dans l'enceinte et de manière instantanée, on ne s'intéresse donc pas à sa distribution spatiale mais à sa concentration totale dans l'enceinte, laquelle dépend des facteurs suivants :

- **Flux entrant et sortant de l'enceinte** : il correspondrait dans notre cas au débit de renouvellement tant pour l'impulsion que pour l'extraction. On le désigne comme F_{in} et F_{out} et on l'exprime en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.
- **Émissions** : la quantité d'espèce chimique qui est générée par apport direct à l'atmosphère. On la désigne comme E et on l'exprime en h^{-1} .
- **Production chimique** : la quantité d'espèce chimique qui est générée à partir de réactions chimiques avec d'autres espèces. On la désigne comme P et on l'exprime en h^{-1} .
- **Perte chimique** : la quantité d'espèce qui est éliminée en raison de la température ambiante, niveau de rayonnement UV, interaction avec d'autres espèces, etc. On la désigne comme L et on l'exprime en h^{-1} .

- **Dépôt** : la quantité d'espèce qui est éliminée par dépôt sur les surfaces. On la désigne comme D et on l'exprime en h^{-1} .

Il convient de souligner que tant les gains que les pertes de l'espèce chimique ont été modélisés comme de premier ordre de sorte qu'on suppose qu'ils sont indépendants de la concentration de quanta présente dans l'enceinte. Ainsi, à partir du «One Box Model» cité précédemment, le flux entrant et sortant peut être converti en une perte (nombre de renouvellements par heure) et peut être combiné avec les autres pertes en un facteur λ correspondant à :

$$\lambda = \frac{F_{out}}{V} + D + L$$

Avec $F_{in} = F_{out}$ où V correspond au volume de l'enceinte étudiée et en considérant que le débit de renouvellement introduit seulement de l'air propre. Dans le cas présent, on omet les gains par production chimique car les particules infectieuses ne peuvent pas être générées au moyen de réactions chimiques avec les autres espèces présentes dans l'atmosphère. Ainsi, la concentration de quanta en fonction du temps, $C(t)$, est modélisée dans l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{E}{V} - \lambda C(t)$$

L'équation différentielle se résout de manière analytique pour trouver la fonction $C(t)$ et s'exprime comme :

$$C(t) = C_0 e^{-\lambda t} + \frac{E\eta}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t})$$

Avec η représentant l'efficacité des masques utilisés et C_0 la concentration de quanta initiale. Pour calculer la probabilité d'infection durant un intervalle, on a besoin d'obtenir la valeur moyenne de concentration par intégration :

$$\bar{C} \Big|_{t_0}^{t_1} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_1} C(t) dt = \frac{C_0}{\lambda \Delta t} (1 - e^{-\lambda \Delta t}) + \frac{E\eta}{\lambda V} \left[1 - \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - e^{-\lambda \Delta t}) \right]$$



En introduisant l'efficacité du masque η , la fraction de personnes avec un masque f et le débit de respiration Q , on obtient la quantité de quanta inhalés :

$$q_{inh} = \bar{C} \int_{t_0}^{t_1} Q \Delta t (1 - f\eta)$$

Enfin, on peut calculer la probabilité pour un seul événement ou intervalle en appliquant l'équation de Wells-Riley :

$$p = 1 - e^{-q_{inh}}$$

Si on veut calculer la probabilité cumulée après un événement avec plusieurs intervalles ou bien de multiples répétitions du même événement, on doit calculer séparément la probabilité d'infection pour chaque événement ou intervalle et les combiner selon :

$$p = p_0 + \sum_{i=1}^n \left(p_i \prod_{k=0}^{i-1} (1 - p_k) \right)$$

Où les suffixes i et k représentent les probabilités correspondant respectivement au i -ième et au k -ième intervalle.

3.3 Utilité - Application dans le secteur

Tel qu'exposé précédemment, on peut considérer la grande utilité de ce modèle pour essayer d'analyser le risque de contamination compte tenu d'un événement. En outre, ce modèle peut être d'une grande utilité pour le secteur de la ventilation car il permet :

1. Analyser le risque : le premier usage est celui déjà décrit précédemment. C'est un bon outil pour connaître le risque d'infection compte tenu des conditions actuelles de la salle.
2. Dimensionner des installations de ventilation : en fixant les conditions de la salle (nombre de personnes, dimensions, efficacité des masques, activité, etc.) et en fixant le risque d'infection qu'on serait disposé à assumer, on peut obtenir les renouvellements d'air nécessaires pour atteindre cette probabilité.

3. Analyser le risque relatif à différents types d'installation : en partant de deux installations différentes avec des débits différents, on peut obtenir la probabilité d'infection de chacune d'elles, en supposant toujours qu'il y a une personne contaminée dans la salle.

4. Cas d'étude

Nous analyserons plusieurs configurations différentes pour chaque cas (salle de classe, bar/restaurant et bureau). Mais en fixant dans les renouvellements d'air qui s'effectueront :

1. Ventilation naturelle : on suppose un débit de ventilation naturelle équivalent à 0,75 renouvellement d'air par heure. Comme on peut le voir en [19] et [20], la ventilation naturelle peut grandement varier en fonction des conditions extérieures. Par conséquent, la valeur choisie est seulement une référence pour pouvoir analyser une configuration avec ventilation naturelle. On a considéré la ventilation naturelle selon la recommandation officielle d'ouverture des fenêtres.
2. Ventilation définie par le RITE.
3. Ventilation nécessaire pour réduire à 1% de probabilité d'infection [21].

4.1 Informations importantes

On détaille dans cette section les paramètres du modèle qui sont constants ou extraits de la littérature consultée pour toutes les études réalisées. On synthétise dans le Tableau 4.1 les variables caractéristiques de chacune d'elles.

Pour les pertes de premier ordre, c'est-à-dire les pertes par dépôt et par perte chimique, on prend $D = 0,3$, $L = 0,56$ (voir 3.2) selon les recommandations respectivement données par [23] et [24].

Quant à l'efficacité des masques, on considère dans tous les cas une efficacité de 50% tel qu'il est recommandé en [16]. En dépit du fait que l'efficacité théorique des masques soit bien supérieure (>95% pour les masques FFP2 par exemple), on a démontré [16] qu'en ne l'ajustant pas hermétiquement au visage, il se produit des infiltrations d'air tant inhalé qu'exhalé, toutes les particules en suspension ne sont donc pas retenues dans le masque.

En ce qui concerne les débits de respiration, ceux-ci ont été ajustés en fonction de l'âge et de l'activité physique selon les recommandations du standard 62 de l'ASHRAE

[24]. Pour la salle de classe, le débit de respiration est inférieur, s'agissant d'enfants au lieu d'adultes. Quant au taux d'expiration de quanta, qui est le paramètre présentant la plus grande variabilité, on prend des valeurs conformes aux dispositions énoncées en [14] et [15]. Concrètement, dans le cas de la salle de classe, on distingue des taux différents pour professeur et élèves. Dans le cas du bar, le serveur expire un plus grand nombre de quanta du fait qu'il réalise un exercice physique (plus grand taux métabolique).

On présente dans le Tableau 4.1 les principaux paramètres pour les cas étudiés.

	Volume [m3]	Nombre de personnes	Débit de respiration [m3/h]	Taux d'expiration de quanta [quanta/h]
Salle de classe	192	24	0,66	25/12,5
Bar - 1	270	35	0,72	38,3
Bar - 2	270	35	0,72	25
Bureau	780	40	0,72	25

Tableau 4.1 Paramètres caractéristiques des cas étudiés

4.2 Salle de classe

L'un des cas intéressants à étudier est celui d'une école. A cette fin, on considère une salle de classe de dimensions 8 x 8 x 3 m comptant 24 élèves et 1 professeur qui est considéré contaminé et dans laquelle tous portent des masques. Pour recréer les temps d'occupation de la salle, on suppose qu'on réalise 2 heures de cours le matin suivies de 30 minutes de récréation puis de 2 autres heures de cours. Ensuite, on réalise une pause de 2 heures pour le déjeuner, après lequel on reprend les cours durant 2 autres heures. Il convient de mentionner que pour les intervalles où on vide la salle de classe, la concentration de doses infectieuses dans l'atmosphère se réduit progressivement en l'absence de nouveaux apports. La Fig. 4.1 montre l'évolution de la concentration de doses infectieuses au fil du temps pour les renouvellements par heure sélectionnés précédemment. On observe qu'un plus grand nombre de renouvellements par heure a deux conséquences : la concentration d'équilibre est atteinte plus rapidement et la valeur d'équilibre est moindre.

On peut conclure également qu'en respectant au minimum les renouvellements par heure (ACH) recommandés par le RITE, on parvient à éliminer la quasi-totalité du virus durant les pauses établies tandis que cela n'est pas possible seulement avec la ventilation naturelle.

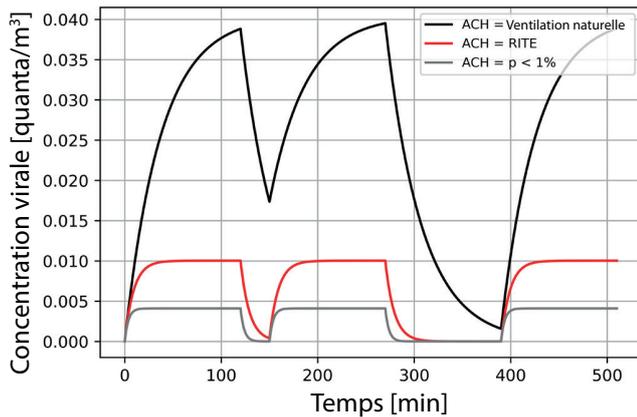


Figure 4.1 Evolution temporelle de la concentration pour différents niveaux de renouvellement d'air par heure.

Après avoir analysé la concentration de doses infectieuses dans l'atmosphère, on procède au calcul de la probabilité cumulée d'infection en fonction des renouvellements par heure disponibles. On peut apprécier sur la Figure 4.2 l'évolution de ladite probabilité à la fin des intervalles évoqués précédemment.

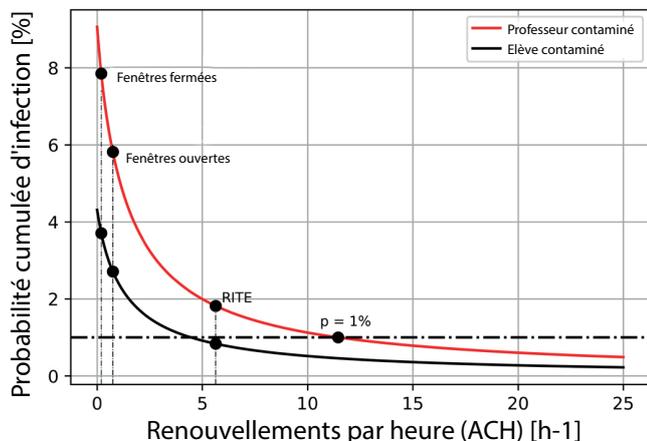


Figure 4.2 Evolution des probabilités d'infection pour différents niveaux de renouvellement d'air par heure.

Dans le cas de la ventilation naturelle, la probabilité d'infection est d'environ 6%, ce qui signifie qu'un élève sera contaminé à la fin de la journée d'école. Dans le cas des renouvellements par heure indiqués dans le RITE, avec lesquels on obtient une probabilité de contamination trois fois inférieure par rapport à une ventilation naturelle (en ouvrant les fenêtres) et pour ceux correspon-

nant à une probabilité de 1%, il ne se produira aucune contamination parmi les élèves.

Toutefois, dans l'hypothèse où le professeur se rendrait dans la salle durant 4 jours en étant infectieux (hypothèse raisonnable compte tenu du temps nécessaire à la manifestation des symptômes) : avec une ventilation naturelle, la probabilité cumulée se situerait à 21%; avec les renouvellements par heure établis dans le RITE, la probabilité se situe environ à 7% tandis que pour la quantité de renouvellements par heure correspondant à une probabilité de 1%, elle se situerait à 4%. Si on calcule à nouveau le nombre d'élèves contaminés au bout des 4 jours, on obtiendrait respectivement 5, 2 et 1 contaminé(s).

Si on considère le cas sans ventilation, en considérant seulement les fuites possibles (on l'a décompté comme 0,2 ACH [19], [20]), on voit que le risque d'infection quotidien augmente jusqu'à 7,8%. Cela implique qu'à la fin de la journée, 2 élèves seraient contaminés et 7 élèves au bout des 4 jours.

Un autre cas intéressant à étudier est celui d'un élève contaminé. Dans ce cas-là, du fait que la quantité de quanta expirés par l'élève sera de l'ordre de la moitié, les probabilités d'infection le seront également (voir Figure 4.2). Si on considère le nombre d'élèves infectés à la fin de la journée, respectivement 1 et 0 élève sera infecté dans le cas de la ventilation naturelle et de la ventilation prescrite par le RITE. Si on considère le nombre de contaminations avant que l'élève manifeste des symptômes (4 jours), il sera de 2 et 1.

Enfin, nous avons ajouté un cas en reproduisant les recommandations institutionnelles publiées après la vague de froid. On conseille d'appliquer une stratégie de «ventilation intermittente» avec l'ouverture des fenêtres durant 10 minutes à la fin de chaque heure. Ainsi, on a modifié les intervalles définis dans ce cas pour répondre à la séquence de 50 minutes de fenêtres fermées et 10 minutes de fenêtres ouvertes, en considérant que dans les intervalles où la salle de classe est vide (petit-déjeuner et déjeuner), les fenêtres restent ouvertes tout le temps. Dans le cas des fenêtres fermées, on a considéré un débit de renouvellement équivalent aux possibles fuites dans la salle de 0,2 ACH [19], [20], tandis qu'avec

les fenêtres ouvertes, on a considéré un débit de 8 ACH. On a choisi ce débit car c'est le débit maximum obtenu dans une salle de classe à l'aide d'un système de climatisation et ventilateurs [20].

Par conséquent, le résultat obtenu sera la probabilité d'infection dans un cas très favorable en termes de renouvellement d'air. Comme on l'a vu en [19], la variabilité des débits de renouvellement à laquelle est soumise la ventilation naturelle est très élevée et non contrôlée.

La Figure 4.3 détaille l'évolution de la concentration dans ce scénario de ventilation «intermittente» (de nouveau avec le professeur contaminé) et la compare au cas dans lequel on se conforme aux prescriptions réglementaires. On constate que les concentrations maximales atteintes, en appliquant les prescriptions du RITE à ce cas (entre 5 et 6 renouvellements par heure) sont environ trois fois inférieures à celles atteintes par la «ventilation intermittente». De plus, les probabilités d'infection dans ce nouveau scénario se situent à 4,8%. Ainsi, il se produira 1 contamination à la fin de la journée et 4 au bout de 4 jours en regard des 0 et 2 qui se produirait/aient avec la ventilation prévue dans le RITE.

4.3 Bar/restaurant

Nous analysons à présent deux cas plausibles dans un bar/restaurant. On suppose un local d'une surface de 90 m² avec un volume total de 270 m³, une capacité de 35 clients, tous sans masque, et un serveur avec masque. Le fonctionnement du restaurant comprend 2 services de 2 heures chacun dont la clientèle est renouvelée à chaque fois. Dans le premier cas, on considère un serveur contaminé portant un masque. Dans le deuxième cas, on considère que l'un des clients du premier service est contaminé et qu'il n'y a aucun client contaminé dans le deuxième service.

Comme la clientèle est renouvelée entre le premier et le deuxième service, on doit considérer séparément les probabilités d'infection de chacun car au début du premier service l'atmosphère est exempte de quanta tandis qu'au début du deuxième service il y a une concentration de quanta dépendant de la quantité de renouvellements d'air. Ainsi, on peut observer sur la Figure 4.4 l'évolution de la concentration de quanta par rapport au temps pour les deux cas considérés.

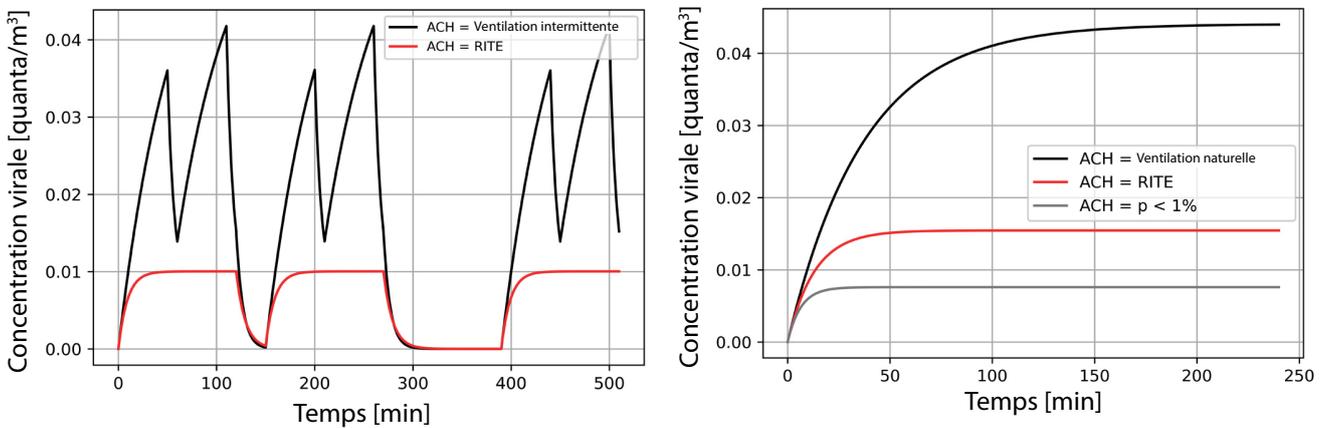


Figure 4.3 Evolution temporelle de la concentration pour différents niveaux de renouvellement d'air par heure

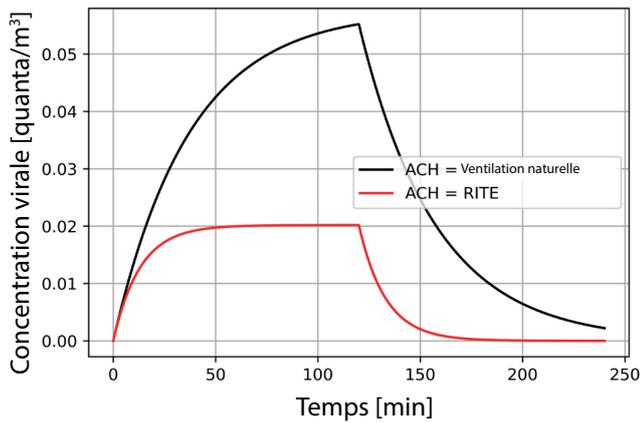


Figure 4.4 Evolution temporelle de la concentration pour différents niveaux de renouvellement d'air par heure. Ci-dessus dans le cas du serveur contaminé et ci-dessous dans le cas du client contaminé dans le premier service.

La Figure 4.5 illustre l'évolution de la probabilité d'infection pour chaque service en fonction des renouvellements par heure dans chacun des cas à considérer. Dans le premier cas, on observe qu'à un plus grand nombre de renouvellements, la concentration d'équilibre est atteinte plus rapidement, la différence de probabilités entre le premier et le deuxième service se réduit donc avec l'augmentation des renouvellements jusqu'à devenir négligeable.

Dans le deuxième cas, même si la différence de probabilités entre le premier et le deuxième service se réduit également avec le nombre de renouvellements par heure, ladite différence est beaucoup plus grande car durant le deuxième service il n'y a aucun apport de quanta à l'atmosphère.

Dans le deuxième cas, on observe qu'on n'a pas ajouté la courbe de probabilité de 1% car on satisfait à ce critère avec le RITE.

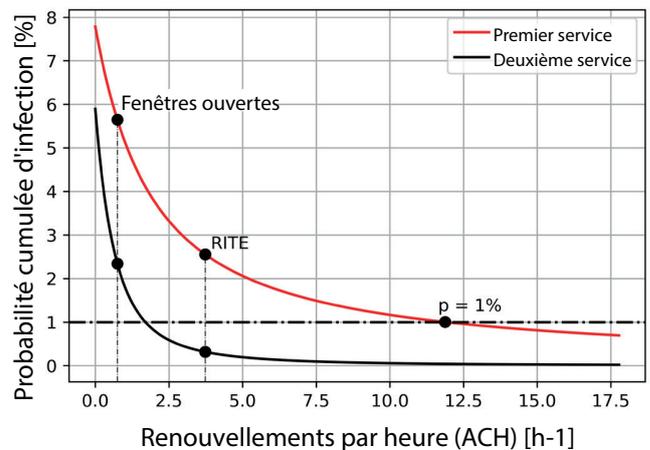
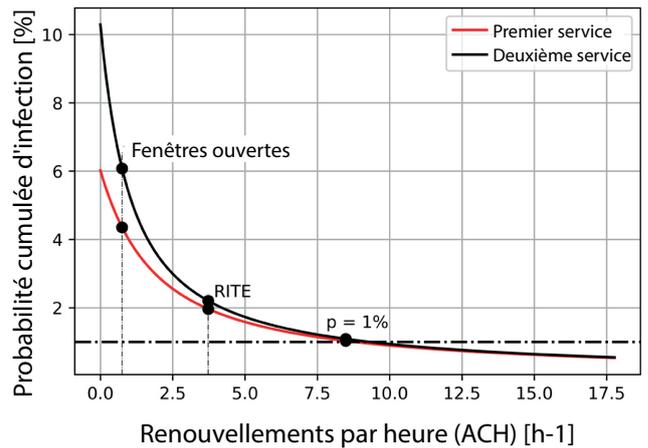


Figure 4.5 Evolution des probabilités d'infection pour différents niveaux de renouvellement d'air par heure pour les premier et deuxième service. Ci-dessus dans le cas d'un serveur contaminé et ci-dessous dans le cas d'un client contaminé dans le premier service.

On peut conclure de manière quantitative que dans le cas de clients d'un restaurant mangeant sans masque, il est essentiel de disposer d'un système de ventilation approprié pour garantir qu'en cas d'entrée d'un client contaminé dans le local, son apport de doses infectieuses dans l'atmosphère se dissipera le plus rapidement possible et réduire considérablement le risque pour les clients du service suivant.

On observe, à l'instar du cas de la salle de classe, que si on respecte la quantité de renouvellements d'air prescrite par le RITE, on réduit de plus de la moitié le risque d'infection.

Quant aux contaminations et en considérant dans chaque cas les débits de ventilation naturelle, les renouvellements établis par le RITE et les renouvellements

nécessaires pour obtenir une probabilité équivalente à 1%, on obtient les résultats présentés dans le Tableau 4.2.

Ventilation	Cas 1 : Serveur contaminé avec masque			Cas 2 : Convive du 1er service contaminé sans masque		
	Naturelle	RITE	<1%	Naturelle	RITE	<1%
Premier service	2	1	0	2	1	0
Deuxième service	2	1	0	1	0	0

Tableau 4.2 Nombre de personnes contaminées dans le cas du bar/restaurant

4.4 Bureaux

On envisage à présent d'étudier les probabilités d'infection dans un bureau de 260 m² et 780 m³ de volume, occupé par 40 employés (dont l'un est contaminé) pendant une journée continue de 7 heures pour différents niveaux de ventilation. On distingue un cas où tous les employés portent un masque et un autre où les employés n'en portent pas.

On observe sur la Figure 4.6 que les concentrations d'équilibre pour les mêmes niveaux de ventilation sont deux fois plus élevées lorsque les employés ne portent pas de masque que lorsqu'ils en portent un (dans les cas où les renouvellements sont fixés).

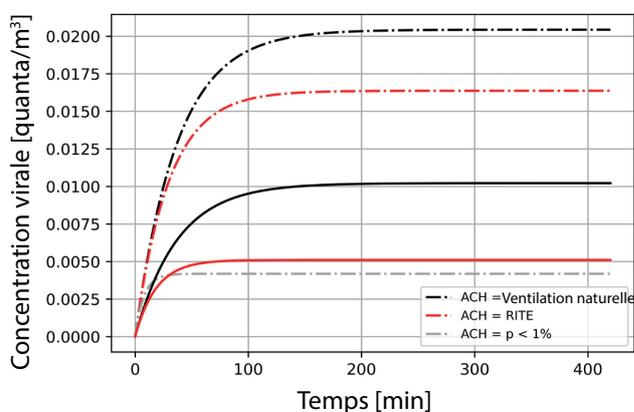


Figure 4.6 Evolution temporelle de la concentration pour différents niveaux de renouvellement d'air par heure (les lignes continues correspondent au cas avec masque).

On décide de ne pas inclure la courbe de concentration dans le cas avec masque et probabilité de 1% car on obtient une courbe très proche de celle obtenue dans le cas du RITE et port du masque.

Concernant les probabilités apparaissant dans la Figure 4.7, on observe que le masque a un effet considérable quant à la réduction des probabilités d'infection, effet particulièrement manifeste si on compare le nombre de renouvellements par heure nécessaires pour atteindre une probabilité inférieure à 1% avec masque et sans masque.

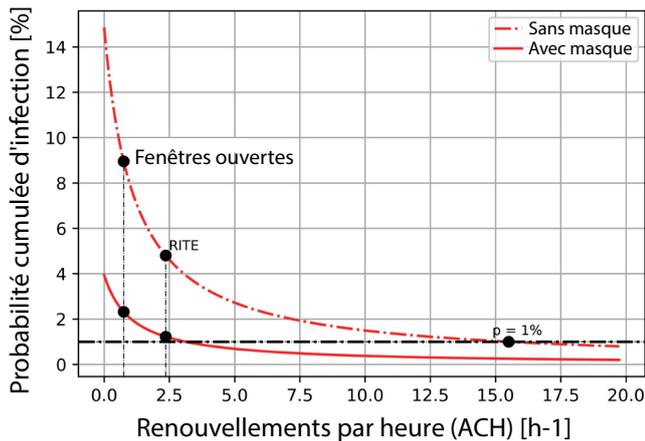


Figure 4.7 Evolution des probabilités d'infection pour différents niveaux de renouvellement d'air par heure et employés avec et sans masque.

Ainsi, avec les employés sans masque, il se produira respectivement 4, 2 et 0 contaminations pour une ventilation naturelle, les renouvellements stipulés par le RITE et ceux nécessaires pour atteindre une probabilité inférieure à 1%. En revanche, si les employés portent le masque, il se produira 1 contamination pour la ventilation naturelle et 0 pour les renouvellements stipulés par le RITE (qui dans ce cas équivalent environ à 1%).

A présent, on reprend l'hypothèse envisagée dans l'étude de la salle de classe et on suppose que l'un des employés se rend 4 jours consécutifs au bureau en étant contaminé. Dans ce cas-là, sans le masque, il se produira 13, 7 et 2 contaminations respectivement pour la ventilation naturelle, les renouvellements stipulés par le RITE et ceux nécessaires pour atteindre une probabilité inférieure à 1%. Cependant, avec les masques, le nombre de contamination se réduira à 4 pour la ventilation naturelle et 2 pour les renouvellements stipulés par le RITE.

4.5 Sensibilité des résultats

Le modèle utilisé dans cet article est particulièrement approprié pour réaliser des études de nature relative ou comparative, c'est-à-dire pour comparer l'impact de la prise de différentes mesures sur l'atténuation du risque d'infection.

Il existe plusieurs paramètres soumis à variabilité et incertitude comme par exemple les ratios d'inactivation et dépôt des particules. Le débit respiratoire entraîne également une certaine incertitude car même s'il est modélisé selon l'âge et le type d'exercice, il dépend également de variables métaboliques et pulmonaires qui sont aussi difficiles à quantifier qu'à généraliser. Cependant, et comme on le démontre dans la littérature [14] et [15], la paramètre présentant la plus grande incertitude est le taux de quanta expiré. Concrètement, on propose des valeurs allant de quelques dizaines de quanta par heure à pratiquement un millier dans le cas d'un super contaminateur.

Au regard des éléments précédents, il convient de mentionner que les probabilités obtenues par le modèle ne doivent pas être prises comme une prédiction exacte mais comme une indication de l'ordre de grandeur. Pour le démontrer, on prend le cas du bureau. On considère deux variables, les renouvellements d'air par heure et le taux d'expiration de quanta. Au lieu d'obtenir une courbe de probabilités, on souhaite à présent observer un nuage de points pour différentes combinaisons de taux d'expiration et nombre de renouvellements.

Les renouvellements d'air par heure sont modélisés comme une distribution uniforme délimitée entre deux valeurs arbitraires (0 et 6 renouvellements) où toutes les valeurs possibles sont équiprobables. En revanche, le taux d'expiration de quanta est modélisé comme une distribution normale avec une moyenne de 25 quanta·h-1 et une variance de sorte que les valeurs de 0 quanta·h-1 et 50 quanta·h-1 apparaissent avec une probabilité équivalente à 3σ .

La Figure 4.8 présente les résultats d'une étude statistique prenant $N = 10\ 000$ points tant de renouvellements d'air par heure que de taux d'expiration de quanta pour lesquels on calcule la probabilité d'infection. Dans le cas de l'échantillonnage de points pour les renouvellements d'air par heure, s'agissant d'une distribution uniforme, on peut prendre des points parfaitement aléatoires. En revanche, pour le taux d'expiration de quanta, on prend les points selon leur densité de probabilité, on obtient par conséquent durant l'échantillonnage plus de points proches de la moyenne que des extrémités de la distribution.

A partir des données précédentes, on calcule les taux d'expiration de quanta qui permettent de délimiter le nuage de points obtenus et on observe quelle est la possible variabilité dans les résultats pour la modélisation des paramètres choisie.

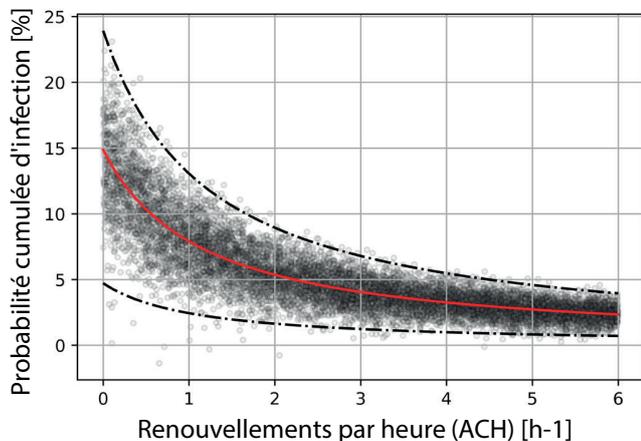


Figure 4.8 Résultats de l'analyse statistique avec $N = 10000$ pour des combinaisons du taux d'expiration de quanta (distribution normale) et des renouvellements par heure (distribution uniforme).

On conclut qu'à plus grand nombre de renouvellements par heure la variabilité est moindre, résultat qui concorde avec ce qui a été observé précédemment dans les analyses de concentration. Pour 0 renouvellement par heure, où on observe une plus grande variabilité, la probabilité d'infection pour un taux d'expiration de 25 quanta·h⁻¹ (moyenne de la distribution) est de 15%, en pouvant varier de 5 à 24% en dépit du fait que la zone présentant la plus forte densité comprend des probabilités allant de 10 à 18%.

5. Conclusions

On démontre que le modèle présenté dans cet article est un outil efficace pour l'analyse et le dimensionnement d'une installation de ventilation mécanique (débit de renouvellement nécessaire) dans l'actuel contexte de pandémie ainsi que pour évaluer l'effet relatif des différentes mesures de prévention contre le virus (temps d'exposition, port du masque, renouvellements d'air par heure). Ledit modèle consiste en une extension du modèle précédemment mentionné dans la section Modèle Ana-

lytique. D'un côté, nous avons implémenté le modèle dans Python pour obtenir une plus grande flexibilité quant aux cas d'étude ainsi que la possibilité de réaliser une analyse plus détaillée au moyen des graphiques et figures présentés. D'un autre côté, la fonctionnalité initiale du modèle de base a été étendue en incorporant la possibilité de définir des événements par intervalles (séquence) avec des paramètres variables (émission de quanta, renouvellements par heure, débits respiratoires, etc.) pour lesquels on peut également calculer la probabilité cumulée. De plus, nous avons modifié les équations pour le «One Box Model» de manière à pouvoir considérer des concentrations initiales de valeur arbitraire.

Les résultats confirment l'importance d'une ventilation appropriée et renforcent les arguments en faveur de l'utilisation de systèmes de ventilation mécanique. Concrètement, la ventilation mécanique permet d'obtenir des débits de renouvellement plus élevés que la ventilation naturelle (dans la plupart des cas) ce qui se traduit par une moindre probabilité d'infection. En plus, elle évite l'entrée de bruit et polluants de l'extérieur, favorise l'économie énergétique et permet une plus grande flexibilité pour la ventilation d'espaces différents. En dépit du fait que la littérature démontre que dans des conditions spécifiques les débits de renouvellement naturel, considéré dans cet article comme l'ouverture des fenêtres, peuvent osciller de valeurs proches de zéro jusqu'à une dizaine de renouvellements par heure, il est également manifeste qu'on a un contrôle très limité sur lesdites conditions. Ainsi, on souligne que la ventilation forcée est particulièrement appropriée car elle permet de contrôler avec exactitude le débit de renouvellement et de le maintenir selon les besoins indépendamment de facteurs extérieurs (quantité, taille et emplacement des ouvertures, gradient thermique intérieur-extérieur, etc.).

Nous avons également analysé l'impact du respect des prescriptions réglementaires (RITE) quant aux probabilités d'infection. On constate qu'avec les débits de renouvellement de l'air intérieur définis par le RITE, on parvient à réduire de plus de trois fois la probabilité d'infection par rapport au cas avec les fenêtres ouvertes. Si on veut réduire davantage la probabilité d'infection, il sera nécessaire de dimensionner les installations avec un débit de renouvellement de l'air intérieur plus important que celui indiqué par la règle.

Cependant, il convient de souligner que le RITE n'a pas été conçu dans un contexte de pandémie et de risque de contamination par aérosols.

Quant à l'incertitude des résultats obtenus, on démontre dans le point 4.5 la difficulté de quantifier le taux d'expiration de quanta et la grande variabilité que cela entraîne. Cependant, l'analyse de sensibilité des résultats pour les cas étudiés permet non seulement d'effectuer des analyses de probabilités de nature relative mais aussi absolue, en tenant toujours compte des limites supérieure et inférieure de l'intervalle de confiance calculé.

Dans le cas des salles de classe, cas auquel une grande attention médiatique a été accordée, une ventilation mécanique satisfaisant aux prescriptions établies dans le RITE parvient à éliminer presque complètement la concentration de virus dans la salle pendant le temps de la récréation (30 min.) et complètement lors de l'arrêt de deux heures pour déjeuner. Cependant, en ouvrant seulement les fenêtres, on ne parvient à éliminer la concentration de virus présente dans l'atmosphère dans aucun des deux intervalles.

6. Bibliographie

- [1] «Organisation Mondiale de la Santé» [Online]. Available : <https://www.who.int/es/news/item/29-06-2020-covidtimeline>. [Accessed 12 2020].
- [2] «Organisation Mondiale de la Santé» [Online]. Available : <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>. [Accessed 12 2020].
- [3] J.L. JIMENEZ, COVID-19 transmission patterns only seem explainable by aerosols, https://docs.google.com/document/d/1Kx4Mka_nORa8LIEwziRY-ZxOX0J8_fffgnt-9TBjxusc/edit.
- [4] J.J.L. JIMENEZ, FAQs on Protecting Yourself from COVID-19 aerosol Transmission, <http://tinyurl.com/faqs-aerosol>, Version 09/12/2020.
- [5] J.L. JIMENEZ, COVID-19 Aerosol Transmission Estimator, <http://tinyurl.com/covid-estimator>, Version 28/11/2020.
- [6] R. Zhang, Y. Li, L. Zhang, Y. Wang and M. J. Molina, «Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19», *PNAS*, vol. 117, n°26, pp. 14857-14863, 2020.
- [7] Liu, Y., Chen, Y., et al. «Aerodynamic analysis of SARS-COV-2 in two Wuhan hospitals», *nature*, vol. 582, pp. 557-560, 2020.
- [8] S.L. Miller, W. W. Nazaroff, J.L. Jimenez, A. Boestra, G. Buonanno, S.J. Dancer, J. Kurtnitski, L.C. Marr, L. Morawska and C. Noakes, «Transmission of SARS-COV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event, 2020.
- [9] Yuguo Li, et al., «Evidence for probable aerosol transmission of SARS-COV-2 in a poorly ventilated restaurant-full, medRxiv, 2020.
- [10] S.E. Hwang, J.H. Chang and J. Heo, «Possible Aerosol Transmission of COVID-19 associated with an Outbreak in an apartment in Seoul South Korea, 2020 «International Journey of Infection Diseases, 2020.
- [11] K. Nissen, K. Janina, D. Akaberi, T. Hoffmann, J. Ling, A. Lundkvist, L. Svensson et S. Erik, «Long-distance airborne dispersal of SARS-COV-2 in COVID-19 wards». *Nature : Scientific Reports*, 2020.
- [12] G. Jiang, C. Wang, L. Song, X. Wang, Y. Zhou, C. Fei et H. Lin, «Aerosol transmission, an indispensable route of COVID-19 spread : case study of a department-store cluster,» *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, vol. 15, n°46, 2021.
- [13] «Organisation Mondiale de la Santé» [Online]. Available : <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted>. [Accessed 12 2020].
- [14] G. Buonanno, L. Stabile and L. Morawska, «Estimation of airborne viral emission : Quanta emission rate of SARS-COV-2 for infection risk assessment, «Environment International, vol. 141, 2020.
- [15] G. Buonanno, L. Morawska and L. Stabile, «Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-COV-2 infection : Prospective and retrospective applications, «Environment International, vol. 145, 2020.
- [16] A. Davies, et al., «Testing the efficacy of homemade masks: would they protect in an influenza pandemic, «Disaster Med Public Health Preparedness, vol. 7, n°4, pp. 413-421, 2013.
- [17] Règlement sur les Installations Thermiques (RITE) - Version consolidée, Madrid, 2013
- [18] Commentaires - Règlement sur les Installations Thermiques (RITE), Madrid, 2007.

- [19] C. Howard-Reed, L.A. Wallace and W.R. Ott, «The effect of opening windows on Air Change Rates in Two Homes, «Journal of the Air and Waste Management Association, vol. 52(2), pp. 147-59, 2002.
- [20] H. Guo, L. Morawska, C. He and D. Gilbert, «Impact of ventilation scenario on air exchange rates and on indoor particle number concentrations in an air-conditioned classroom, «Atmospheric Environment, vol. 42, n°4, pp. 757-768, 2008.
- [21] H. Dai and Z. Bin, «Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces, «Building Simulations, vol. 13, pp. 1321-1327, 2020.
- [22] Suit M., et al. «Airborne SARS-CoV-2 Is Rapidly Inactivated by simulated Sunlight, «The Journal of Infection Diseases, vol. 222, N°4, pp. 564-571, 2020.
- [23] T.L. Thatcher, A.C. Lai, R. Moreno-Jackson, R.G. Sextro and W.W. Nazaroff, «Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors, «Atmospheric Environment, vol. 36, n°11, pp. 1811-1819, 2002.
- [24] ANSI/ASHRAE, The standards for Ventilation and Indoor Air Quality, ANSI, 2019.