



ENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires



Université Claude Bernard



Lyon 1

Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État
pour la validation du double cursus Master BHEE avec l'Université Lyon 1

Année 2020-2021

Voie d'approfondissement :
Bâtiment

Soutenu le 13 septembre 2021

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Emmanuel Gourdon
- Maître de TFE : Gaëlle Guyot
- Expert : Valérie Leprince
- Représentant du Master BHEE : Mohamed El Mankibi

Par

Sabrina SAYAH

Modélisation de l'impact des stratégies de ventilation et d'aération sur la propagation par voie aérienne du virus SARS-CoV-2 à l'origine du Covid

CEREMA Centre-EST, L'Isle d'Abeau



Notice analytique

AUTEUR	
Nom	SAYAH
Prénom	Sabrina
ORGANISME D'ACCUEIL	
Nom de l'organisme et Localité	CEREMA Centre-EST, L'Isle d'Abeau
Nom du Tuteur	Gaëlle GUYOT
ANALYSE DU TFE	
Titre (français)	Modélisation de l'impact des stratégies de ventilation et d'aération sur la propagation par voie aérienne du virus SARS-CoV-2 à l'origine du Covid
Titre (anglais)	Modelling the impact of ventilation and airing strategies on the airborne spread of SARS-CoV-2 virus causing Covid
Résumé (français)	<p>Il est aujourd'hui établi que la propagation par voie aérienne du SARS-CoV-2 fait partie de modes de transmission de la maladie du Covid. Dans ce contexte, l'ouverture des fenêtres est devenue une recommandation largement diffusée. Cette étude examine l'impact de l'ouverture des fenêtres sur les circuits de ventilation, et la transmission du virus. Les bâtiments considérés sont deux logements résidentiels abritant plusieurs occupants, dont une personne contaminée, dans un contexte de confinement de la population. La sensibilité des résultats est étudiée à travers 6 stratégies d'ouvertures des fenêtres et portes, et avec 3 systèmes de ventilations différents. Les résultats sont analysés au vue des variations de débits d'air, des expositions relatives des occupants et du risque d'infection. Ils permettent de montrer que certaines stratégies d'ouverture des fenêtres peuvent augmenter le risque d'infection des occupants se situant dans les différentes pièces du logement, et même dans les logements voisins. En effet, la distribution des flux d'air dans les bâtiments est complexe, influencer les flux d'air en ouvrant une fenêtre ou en calfeutrant une porte peut modifier les flux dans tout le bâtiment. Dans un contexte de pandémie, il faut veiller à ce que les flux d'air circulent des zones les plus contaminées vers les zones plus saines.</p>
Résumé (anglais)	<p>Airborne spread of SARS-CoV-2 is now recognized as a mode of transmission of Covid disease. In this context, the opening of windows has become a widely disseminated recommendation. This study examines the impact of open windows on ventilation systems and virus transmission. The buildings considered are two residential dwellings with several occupants, including one infected person, in a context of population lockdown. The sensitivity of the results is studied with 6 strategies of windows and doors openings, and with 3 different ventilation systems. The results are analysed in the light of the variations in airflow rates, the relative exposures of the occupants and the risk of infection. They show that some window opening strategies can increase the risk of infection for occupants located in different rooms of the dwelling or even in</p>

	neighbouring dwellings. Indeed, the distribution of airflows in buildings is complex; influencing airflows by opening a window or sealing a door can modify the flows in the whole building. In the context of a pandemic, it is important to ensure that air flows from the most contaminated areas to the healthiest areas.		
Mots-clés (français, 5 maxi)	SARS-CoV-2 (Covid19), bâtiments multizones, transmission aérienne, ventilation, risque d'infection		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	SARS-CoV-2 (Covid19), multizone buildings, airborne transmission, ventilation, infection risk		
Termes géo- graphique			
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	67	5	90

Sommaire

Notice analytique	2
Sommaire	4
Liste des illustrations	6
Liste des tableaux.....	7
Remerciements.....	8
Introduction.....	9
1. Contexte	11
1.1 Transmission par aérosol du virus.....	11
1.2 Le rôle important de la ventilation dans les bâtiments : énergie, QAI et transmission du virus 13	
1.3 Estimation du risque d'infection	16
1.4 Objectifs de notre étude.....	18
2. Méthode	20
2.1 Présentation des cas d'étude.....	20
2.1.1 Les bâtiments	20
2.1.2 Les occupants.....	21
2.1.3 Les émissions d'humidité et de CO ₂	24
2.2 Modélisation.....	26
2.2.1 Approche multizone.....	26
2.2.2 Données météorologiques	27
2.2.3 Distribution des défauts de perméabilité.....	28
2.2.4 Systèmes de ventilation.....	29
2.2.5 Portes et fenêtres	32
2.2.6 Particule support du virus : émission et transfert.....	33
2.3 Cas de référence et scénarios étudiés	34
2.4 Indicateurs de performance : Exposition relative et risque d'infection.....	36
2.4.1 Exposition relative	36
2.4.2 Risque d'infection	36
2.4.3 Débits interzones.....	37
3. Résultats	38
3.1 La maison individuelle	38
3.1.1 Ventilation double flux	38
3.1.2 Simple flux.....	42
3.1.3 Simple flux hygroréglable.....	45
3.1.4 Bilan.....	48

3.2	Le bâtiment collectif.....	49
3.2.1	Ventilation double flux	49
3.2.2	Ventilation simple-flux	52
3.2.3	Ventilation simple flux hygroréglable	55
3.2.4	Bilan pour le bâtiment collectif.....	58
4.	Discussion et perspectives	59
	Conclusion	61
	Bibliographie.....	63
	Annexes.....	68

Liste des illustrations

Figure 1 Schéma des vecteurs de transmission du virus [9]	11
Figure 2 : Imagerie vidéo à longue portée sur 8 m du nuage turbulent multiphasique provenant d'une émission humaine naturelle violente telle qu'un éternuement, révélant une portée du nuage, et de sa charge utile concentrée en gouttelettes, allant jusqu'à 7-8 m [14]	12
Figure 3 : a) Flux d'air théoriques dans un logement, b) Flux d'air réels dû aux défauts de perméabilités [57].....	19
Figure 4: Plan de la maison individuelle, rez-de-chaussée (à gauche) et 1 ^{er} étage (à droite).....	20
Figure 5 : Plan du bâtiment	21
Figure 6: Plan appartement de référence.....	21
Figure 7 : Résultats d'exposition relative des occupants de la maison individuelle en système double-flux auto-réglable	38
Figure 8: Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants de la maison individuelle en système double-flux auto-réglable	40
Figure 9 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confiné dans la maison individuelle en système double-flux	41
Figure 10 : Résultats d'exposition relative des occupants de la maison individuelle en système simple-flux auto-réglable	42
Figure 11: Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants de la maison individuelle en système simple-flux auto-réglable	43
Figure 12 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confiné dans la maison individuelle en système simple-flux	44
Figure 13: Résultats d'exposition relative des occupants de la maison individuelle en système simple-flux hygroréglable	45
Figure 14: Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants de la maison individuelle en système simple-flux hygroréglable	46
Figure 15 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confiné dans la maison individuelle en système simple-flux hygroréglable	47
Figure 16 : Résultats d'exposition relative des occupants du bâtiment collectif en système double-flux auto-réglable.....	49
Figure 17 : Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants dans le bâtiment collectif en système double-flux auto-réglable	50
Figure 18 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confiné dans le bâtiment collectif en système double-flux	51
Figure 19 : Résultats d'exposition relative des occupants du bâtiment collectif en système simple-flux auto-réglable.....	52
Figure 20 : Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants dans le bâtiment collectif en système simple-flux auto-réglable	53
Figure 21 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confiné dans le bâtiment collectif en système simple-flux	54
Figure 22 : Résultats d'exposition relative des occupants du bâtiment collectif en système simple-flux hygroréglable	55
Figure 23 : Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants dans le bâtiment collectif en système simple-flux hygroréglable	56
Figure 24 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confiné dans le bâtiment collectif en système simple-flux hygroréglable	57

Liste des tableaux

Tableau 1 : Pièces principales des occupants de la maison individuelle	22
Tableau 2 : Pièces principales des occupants du bâtiment collectif	22
Tableau 3 : Horaires d'occupation des pièces par habitant pour une journée type dans la maison individuelle.....	23
Tableau 4 : Horaires d'occupation des pièces par habitant pour une journée type dans le logement de référence du bâtiment collectif.....	23
Tableau 5: Caractéristiques des données météorologiques à Lyon durant la période étudiée	27
Tableau 6: Caractéristiques des données météorologiques à Paris durant la période étudiée	27
Tableau 7 : Débit des bouches d'extraction du système auto-réglable Maison individuelle.....	30
Tableau 8: Débit des bouches d'extraction du système auto-réglable Bâtiment collectif.....	30
Tableau 9: Débit des bouches d'insufflation du système auto-réglable Maison individuelle	31
Tableau 10 : Débit des bouches d'insufflation du système auto-réglable Bâtiment collectif	31
Tableau 11 : Définition des scénarios	35

Remerciements

Au terme de ce stage de 20 semaines, je souhaiterais remercier toutes les personnes qui ont contribué à son bon déroulement.

Mes remerciements vont tout d'abord à mon maître de stage Gaëlle Guyot, chercheuse et directrice de projet sur les sujets de qualité de l'air et de ventilation, qui m'a accompagnée durant toute cette période de stage avec bienveillance. Ses nombreux conseils et explications sur le sujet ont été essentiels à l'avancement de mon travail.

Je tiens à remercier les membres du jury Emmanuel Gourdon, président du jury, Valérie Leprince, experte, et Mohamed El Mankibi, représentant du master BHEE, pour le temps certain consacré à lire et rapporter ce travail.

Un grand merci à l'ensemble de l'équipe du Cerema à l'Isle d'Abeau qui m'a chaleureusement accueillie dans ses locaux.

Je remercie également Baptiste Poirier pour son aide apportée sur l'utilisation du logiciel Contam.

Pour finir, je souhaite remercier mes camarades stagiaires au Cerema, ainsi que mes amis et collègues de télétravail à l'ENTPE qui ont été un soutien tant moral que professionnel durant ce stage. Plus particulièrement, je remercie Mathilde et Amira pour la relecture de ce rapport.

Introduction

Fin décembre 2019, un nouveau coronavirus appartenant au sous-genre Betacoronavirus, le SARS-Cov-2, est apparu dans la ville de Wuhan, dans la province du Hubei, en Chine. Très rapidement, ce virus s'est propagé en Chine puis dans tous les territoires du monde. Ainsi, le 12 mars 2020, l'organisation mondiale de la santé a déclaré la nouvelle maladie à coronavirus 2019 (Covid-19) comme une pandémie mondiale [1]. Aujourd'hui, le Covid-19 a causé plus de 200 millions d'infection et 4,5 millions de décès à travers le monde [2].

Dans ce contexte, les différents pays du monde ont mis en place des mesures de freinage appelé « mesures barrières ». En France, ces mesures sont maintenant bien connues, on peut notamment citer les gestes suivants :

- Se laver régulièrement les mains ou utiliser une solution hydro-alcoolique,
- Tousser ou éternuer dans son coude ou dans un mouchoir,
- Se moucher dans un mouchoir à usage unique
- Respecter une distance d'au moins un mètre avec les autres

Depuis le 20 octobre 2020, l'aération fait partie des gestes barrières. Il est recommandé d'aérer les pièces au moins trois fois par jour [3]. Nous verrons dans la suite de ce travail qu'il est en effet maintenant prouvé qu'un mode de transmission majeur du virus est la transmission par voie aérienne. Les mesures d'aération visent donc à limiter ce mode de transmission.

Alors que le secteur médical se concentre sur la recherche de traitements et remèdes pour lutter contre les effets du virus, la recherche en ingénierie tente d'évaluer les risques dans les environnements intérieurs en simulant la transmission du virus dans l'air pendant une épidémie. Avec le mode de transmission par voie aérienne, la ventilation devient un facteur clé à prendre en compte.

Il faudra alors comprendre les enjeux de la ventilation dans les bâtiments. Il s'agit d'un sujet complexe qui comprend notamment des enjeux énergétiques et de qualité de l'air intérieur. L'ouverture d'une fenêtre a plusieurs conséquences : elle peut notamment modifier le sens des flux d'air dans le bâtiment, en plus d'augmenter les pertes énergétiques et de potentiellement créer un stress thermique pour les occupants.

Ainsi, ce travail proposera une étude de l'impact de différentes stratégies de ventilation et d'aération sur la propagation par voie aérienne du virus SARS-CoV-2.

Tout d'abord, une première partie de mise en contexte permettra d'introduire les éléments nécessaires à l'étude de la transmission du virus par voie aérienne, elle aboutira à la formulation de la problématique sous forme de deux questions :

- Premièrement, quels sont les impacts d'une ventilation conçue pour créer des flux d'air circulant des zones généralement les moins polluées (chambres, salons, bureaux, salles de classe) aux zones généralement les plus polluées (salles de bain, toilettes, cuisine), lorsqu'une zone habituellement peu polluée devient une zone hautement contaminée ?

- Deuxièmement, quel est l'impact de la recommandation généralisée de l'ouverture des fenêtres sur les flux de ventilation et, plus largement, sur l'exposition aux particules contaminés des occupants du bâtiment ? Il faudra considérer les risques d'infection de l'ensemble des occupants du bâtiment, pas seulement ceux se situant dans la pièce d'émission des particules de virus.

Afin de répondre à ces deux questions, à l'aide d'un logiciel de simulation aéraulique, nous modélisons dans cette étude la distribution des flux d'air due à l'ouverture des fenêtres dans une maison individuelle et dans un appartement d'un bâtiment collectif, où les familles sont isolées dans un contexte de pandémie tel que les confinements connus durant la crise du Covid-19.

La partie 2 présentera la méthodologie utilisée : les bâtiments étudiés, leur modélisation, les stratégies de ventilation testées et les indicateurs des résultats.

La partie 3 concernera la présentation et l'analyse des résultats au vue de trois critères pour chacune des stratégies : l'évolution de l'exposition des occupants au virus par rapport au cas sans stratégie d'aération, l'estimation du risque d'infection des occupants et la répartition des débits d'air circulant entre les zones.

Ensuite, dans la partie 4, les résultats seront discutés au vue de l'incertitude de certains paramètres du modèle, et de leur implication pour d'autres bâtiments.

Pour finir, la partie 5 conclura l'étude puis présentera quelques perspectives.

1. Contexte

1.1 Transmission par aérosol du virus

Lors des précédentes pandémies créées par des virus de type grippaux (grippe aviaire) et des coronavirus (SARS-CoV-1, MERS), les transferts via des gouttes ou gouttelettes et le contact avec des surfaces contaminées étaient identifiés comme les modes de transmission prédominant du virus. Cependant, des preuves ont mis en évidence le risque de formation d'aérosols pouvant se déplacer dans l'air, provenant soit des éternuements, soit des matières fécales [4, 5]. Une revue détaillée de la littérature a été entreprise par Fernstrom et Goldblatt [6], qui ont analysé un grand nombre de virus pouvant être transmis par voie aérienne, ainsi que les origines de ces virus et les conditions environnementales qui permettent (ou empêchent) la survie et la capacité de déplacement des aérosols infectieux.

Ainsi, dans le cas de la nouvelle pandémie du SARS-Cov-2, les vecteurs de transmission sont souvent décrits en trois catégories [5,6] :

- les gouttes et gouttelettes : elles sont émises par une personne infectée lorsqu'elle tousse ou qu'elle parle. Elles peuvent transmettre le virus aux personnes se trouvant à proximité lorsqu'elles rentrent en contact avec ses yeux, sa bouche, ou son nez. Leur taille peut être importante, en général on parle de gouttelettes pour des particules supérieures à 300 μm qui tombent au sol en quelques secondes du fait de la gravité,
- les surfaces contaminées (fomites) : lorsque des gouttelettes atterrissent sur des surfaces et qu'un tiers les touche puis porte ses mains à ses yeux, sa bouche ou son nez, alors le virus peut être transmis. Aujourd'hui, il est établi que ces surfaces contaminées jouent un rôle mineur dans la propagation du virus SARS-Cov2 ;
- les aérosols : il s'agit de petites particules infectieuses invisibles (moins de 100 μm de diamètre) exhalées par une personne infectée. Elles peuvent provenir de la salive, des poumons des muqueuses et des voies respiratoires. Une fois sorties de la bouche, elles se comportent de manière similaire à la fumée. Elles peuvent rester en suspension dans l'air.

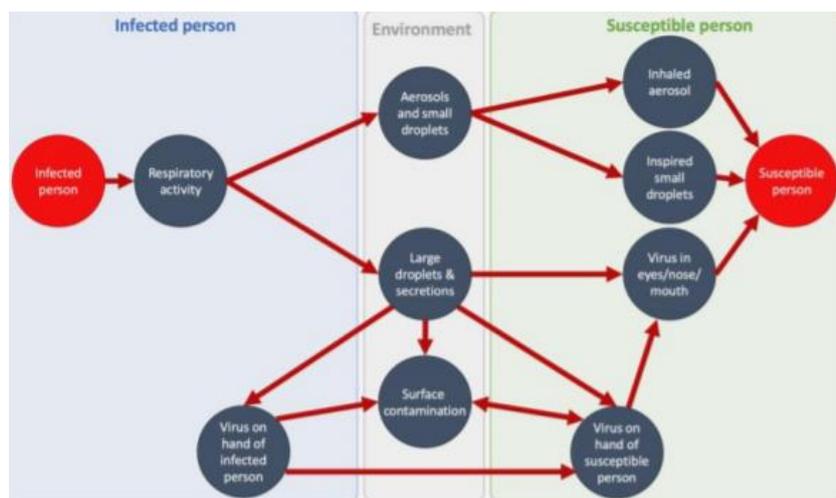


Figure 1 Schéma des vecteurs de transmission du virus [9]

En effet, lorsque nous respirons, parlons, chantons, toussons, éternuons, etc., des gouttelettes de toutes tailles sont émises et déplacées par un nuage (respiratoire) de gaz turbulent, chaud et humide. Ce fluide respiratoire ne contient pas uniquement des particules de virus, puisqu'elles sont accompagnées de sels, protéines, tensioactifs, et d'autres virus et bactéries [10]. Ce nuage maintient les particules de virus à un niveau de concentration élevé sur plusieurs mètres où elles sont transportées en quelques secondes. Ensuite, lorsque le nuage ralentit suffisamment, la ventilation

et les schémas spécifiques d'écoulement de l'air prennent un rôle important dans la transmission du virus. La charge virale de l'émetteur, la durée d'exposition et la susceptibilité d'un individu à l'infection sont d'autres facteurs importants [11]. En utilisant des mesures d'imagerie à haute fréquence sur des volontaires, il a été démontré que lorsque les individus toussent et/ou éternuent, en plus de projeter des gouttes et des gouttelettes, un aérosol se forme. Il peut se déplacer très rapidement sur des distances de 6 à 8 mètres [10, 11].

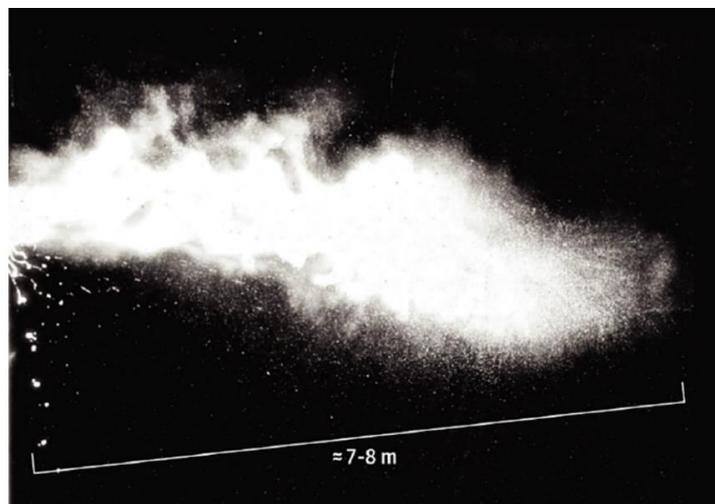


Figure 2 : Imagerie vidéo à longue portée sur 8 m du nuage turbulent multiphasique provenant d'une émission humaine naturelle violente telle qu'un éternuement, révélant une portée du nuage, et de sa charge utile concentrée en gouttelettes, allant jusqu'à 7-8 m [14]

Cependant, la distinction entre les gouttelettes et les aérosols n'est pas stricte [11]. En effet, cette dichotomie est basée sur la taille des particules, alors qu'il s'agit d'un paramètre continu. Plus les particules sont grosses et plus elles auront tendance à tomber rapidement. Au contraire, plus les particules sont petites, plus elles resteront en suspension dans l'air. Il existe aussi d'autres paramètres qui influent sur le comportement des particules, comme la vitesse d'expulsion ou le flux d'air environnant (vitesse, turbulence, direction, température, humidité relative). Ainsi, il paraît plus adapté de définir les gouttelettes comme les particules qui tombent au sol (ou sur une autre surface horizontale) sous l'influence de la gravité ou de l'élan lors de leur expiration ; et les aérosols comme celles qui restent en suspension dans l'air du fait de leur taille et/ou des conditions environnementales [15].

La transmission du SARS-COV-2 par aérosol avait été sous-estimée au début de la pandémie. Aujourd'hui, plusieurs articles prouvent qu'il s'agit d'un mode de transmission important, et même du mode de transmission dominant [14, 15, 16].

Dans le cas du SARS-CoV-2, plusieurs études de cas ont suggéré, voire confirmé, que cette hypothèse de formation d'aérosols contaminants pouvait être effective dans un environnement intérieur. La première étude de van Doremalen et al. [19] est basée sur une étude expérimentale qui a tenté de reproduire, par nébulisation, la suspension aérienne du virus après la toux d'un patient. Ces chercheurs ont montré que le SARS-CoV-2 pouvait survivre pendant trois heures sous forme d'aérosol (<5µm). Plusieurs études de cas et articles scientifiques ont poursuivi cette ligne d'investigation et ont mis en évidence le risque de transmission du SARS-CoV-2 par voie aérienne [20] [21]–[23]. En conséquence, plusieurs scientifiques ont pris des mesures pour alerter la communauté scientifique internationale et les décideurs publics. Ils appellent à la prise en compte de la transmission aérosol du SARS-CoV-2 pour une prévention plus efficace des évolutions de

l'épidémie [24]. Dans le contexte du SARS-CoV-2, les équipes de recherche rappellent l'importance de prendre en compte des modèles plus récents et précis de formation, de changement de phase et de transport des aérosols, qui remettent en cause l'efficacité des recommandations sur la distance sociale à respecter entre les personnes, à savoir 1 à 2 mètres [9, 12].

Parmi les exemples les plus connus, on peut citer plusieurs cas de supercontamination dans des endroits aux conditions particulières, souvent dans des pièces remplies ou mal ventilées. Le plus célèbre exemple est sans doute le cas d'une répétition d'une chorale américaine, Skagit Valley chorale. Dans une salle de répétition, 61 personnes se sont réunies sans masque pour chanter, une personne infectée a alors contaminé 53 autres personnes en 2h30. Un deuxième exemple très célèbre concerne un restaurant dans le Ghangzou, en Chine, où une contamination a eu lieu entre trois familles assises à des tables différentes (9 cas au total). Le visionnage des caméras du restaurant et une étude de la mécanique des fluides dynamiques (méthode CFD) dans la salle a permis de montrer que la transmission du virus ne peut pas s'expliquer seulement par les gouttelettes : les flux d'air et les climatiseurs jouent également un rôle [25]. Un autre exemple concerne un voyage en bus en Chine, d'une durée de deux heures, au cours duquel 23 des 68 passagers ont été contaminés [26]. Ces exemples ont tous la même particularité, la pièce était mal ventilée et, du fait de la disposition des personnes dans les salles ou le bus, seule une transmission par aérosols peut expliquer les contaminations [27].

Quelques plus rares exemples prouvent également la possible transmission du virus entre différentes pièces d'un bâtiment. Un cas en Nouvelle Zélande illustre bien ce phénomène. La Nouvelle-Zélande avait mis en place des hôtels dédiés à l'isolement où devait séjourner toutes les personnes qui désiraient entrer dans le pays. Ainsi, chaque personne était régulièrement testée, des études ont alors pu montrer que des contaminations par aérosols entre les chambres de cet hôtel étaient très probables [22]. L'étude d'un autre cluster, dans un immeuble d'habitation à Séoul où des voisins qui n'ont pas eu de contact direct entre eux se sont contaminés, a également désigné comme hypothèse la plus probable de contamination, la voie aérienne à travers des conduits d'air (tous les cas se situaient sur deux lignes verticales du bâtiment reliées par un même conduit d'air) [28].

A la fin de l'année 2020, même si plusieurs questions restent à résoudre [29], ce mode de transmission a été reconnu par l'OMS [30] et les centres américains et européens de prévention et de contrôle des maladies CDC [27, 28]. Afin de prévenir la transmission du Covid-19, plusieurs pays ont alors rajouté dans leur liste des gestes barrières l'aération, et des actions sur les systèmes de ventilation des bâtiments, ou dans les protocoles nationaux.

1.2 Le rôle important de la ventilation dans les bâtiments : énergie, QAI et transmission du virus

La ventilation et la circulation de l'air dans les bâtiments constituent depuis longtemps un domaine de recherche important en raison de leur impact crucial sur deux questions : la qualité de l'air intérieur (QAI) et la réduction de la consommation d'énergie.

En effet, d'une part, comme les gens passent 60 à 90 % de leur temps à l'intérieur (dans des logements, des bureaux, des écoles, etc.), la qualité de l'air intérieur (QAI) est un facteur important pour la santé publique [33]. D'autre part, les environnements intérieurs sont souvent plus pollués que les environnements extérieurs [34]. Ainsi, selon l'Organisation mondiale de la santé [35], 99 000 décès en Europe étaient attribuables à la pollution de l'air intérieur en 2012. Certains auteurs

ont montré qu'en raison d'une occupation plus importante des logements pendant le confinement lié à la crise du Covid-19, à des changements d'activités (davantage de cuisine, davantage de nettoyage) et à un manque de possibilités d'adaptation des systèmes de ventilation, les polluants de l'air intérieur pouvaient atteindre des niveaux dangereux pour la santé des occupants [36]. Ils conseillent de prendre des mesures pour y remédier si d'autres mesures de confinement des populations viennent à se reproduire suite à une pandémie.

Du point de vue de la performance énergétique des bâtiments, il faut s'efforcer de repenser les flux d'air de ventilation en raison de leur impact sur les pertes thermiques. Dans ce contexte, une plus grande attention est accordée à la conception de la ventilation et à sa mise en œuvre sur site, et les systèmes de ventilation deviennent plus efficaces sur le plan énergétique avec des systèmes incluant la récupération de chaleur ou des systèmes intelligents avec des débits d'air variables en fonction des conditions [37] [38].

L'épidémie actuelle de Covid-19 a mis en évidence un nouvel enjeu de la ventilation des bâtiments: la prévention de la propagation des maladies. La revue de la littérature analysant les virus transportés par voie aérienne révèle un manque de données permettant de passer de la théorie aux pratiques de prévention, notamment en ce qui concerne les conditions de ventilation influençant les conditions environnementales qui favorisent (ou entravent) la survie et le transport des aérosols infectieux [6]. Plusieurs auteurs ont identifié une mauvaise ventilation comme un facteur particulier favorisant la transmission du SARS-CoV-2 [39], [40]. Jones et al. [41] ont proposé une approche combinant plusieurs facteurs de risque : occupation (faible/élevée), port du masque, durée du contact (court/prolongé), type et niveau d'activité du groupe (silencieux/parlant/criant/chantant) et qualité de la ventilation (extérieur et bien ventilé, intérieur et bien ventilé, mal ventilé). Cependant, ils ne définissent pas ces derniers termes et concluent que les règles relatives à la distanciation physique devraient refléter les multiples facteurs qui affectent le risque, y compris la ventilation.

Des directives techniques pour la ventilation des bâtiments ont été fournies par deux associations internationales : the Federation of European of Heating, Ventilation, and Air-conditioning Associations (REHVA) et l'American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE).

L'association européenne REHVA a rédigé des recommandations dans un guide intitulé "Comment faire fonctionner et utiliser les installations techniques des bâtiments afin d'éviter la propagation du virus de la maladie du coronavirus (COVID-19) (SARS-CoV-2) sur les lieux de travail." [42]. Il concerne la ventilation des bureaux et des bâtiments ouverts au public (hors hôpitaux et établissements de santé), et soulèvent notamment les points d'attention suivants :

- Il est nécessaire de relancer la ventilation au moins deux heures avant l'occupation des lieux, et de l'éteindre ou la réduire au moins deux heures après.
- Le conseil général est de fournir autant d'air extérieur qu'il est raisonnablement possible. Le paramètre en jeu est la quantité d'air extérieur frais fourni par mètre carré par surface au sol ou par personne.
- L'utilisation active des fenêtres (beaucoup plus que la normale, même si cela entraîne un certain inconfort thermique) est à mettre en place. L'ouverture des fenêtres est le seul moyen d'augmenter le taux de renouvellement de l'air dans certains bâtiments, il est alors recommandé d'ouvrir les fenêtres pendant environ 15 minutes lorsqu'on entre dans la pièce (surtout lorsque la pièce a été occupée par d'autres personnes auparavant). De plus, dans

les bâtiments équipés d'une ventilation mécanique, l'ouverture des fenêtres peut être utilisée pour augmenter encore la ventilation.

- L'ouverture des fenêtres dans les toilettes doit être évitée afin de maintenir une pression négative dans les toilettes et la bonne direction de la ventilation mécanique.
- Dans le cas du SARS-COV-2, faire varier l'humidité relative et la température n'est pas une solution possible pour agir sur les propriétés de la transmission du virus dans les bâtiments. En effet, ces paramètres influent sur la viabilité de certains virus, la formation de noyaux de gouttelettes et la sensibilité des muqueuses des occupants, mais les coronavirus sont assez résistants aux changements environnementaux et ne sont sensibles qu'à une humidité relative très élevée, supérieure à 80 %, et à une température supérieure à 30 °C, qui ne sont pas atteignables et acceptables dans les bâtiments pour des raisons de confort thermique et pour éviter la croissance microbienne.

Contrairement à REHVA, l'ASHRAE ne recommande pas d'aérer au maximum mais plutôt au minimum nécessaire, ils mettent en garde contre le risque de créer un inconfort thermique qui diminuerait la résistance des individus aux infections. De plus, aérer au maximum engendre des problématiques énergétiques, de confort et de qualité de l'air intérieur [43]. L'ASHRAE a publié divers guides de recommandation pour différents types de bâtiments (y compris les bâtiments médicaux et de transport). Il existe un guide pour les bâtiments résidentiels. Il recommande notamment [44] :

- utiliser des filtres à haute efficacité de type MERV 13 et des purificateurs d'air HEPA portables ;
- augmenter la ventilation de l'air extérieur, lorsque les conditions le permettent, en utilisant le système de ventilation ou l'ouverture des fenêtres ;
- dans les immeubles de grande hauteur, vérifier que les grilles d'entrée d'air vicié évacuent correctement l'air. Passer également en revue les précautions à prendre pour ouvrir les fenêtres des bâtiments afin de minimiser la transmission entre les unités d'habitation ;
- minimiser la transmission à partir des salles d'eau en faisant fonctionner l'extraction d'air de préférence en continu. Les couvercles des toilettes doivent rester fermés.
- créer un espace d'isolement pour les membres infectés du ménage: l'espace d'isolement doit être doté de barrières et être alimenté en air provenant du reste du logement, ce qui peut être réalisé à l'aide d'un petit ventilateur d'extraction installé temporairement dans une fenêtre. Faire également fonctionner un filtre à air HEPA portable en permanence dans cet espace.
- créer un espace protégé pour les membres du ménage à haut risque: l'espace protégé doit avoir des barrières physiques et être soumis à une circulation d'air vers le reste de l'habitation. Cela peut se faire à l'aide d'un petit ventilateur d'alimentation installé temporairement dans une fenêtre. L'utilisation d'un filtre à air HEPA portable dans cet espace est également conseillée.

Cependant, l'étude de la ventilation et de son rôle dans la propagation des aérosols dans les bâtiments n'est pas un sujet simple. En effet, chaque bâtiment est spécifique de par son plan (architecture), son type de système de ventilation et le comportement de ses occupants. Les mouvements d'air dans les bâtiments sont guidés par des lois physiques qui dépendent des différences de pression interzones et des défauts de perméabilités. Les différences de pression sont influencées par 3 moteurs : le vent, les différences de température (tirage thermique), et les moteurs des systèmes de ventilation qui vont imposer des débits connus extraits (bouche d'extraction) et/ou insufflés (bouches d'insufflation).

Dans ce contexte, il convient de souligner que les performances de la ventilation sur site ont fait l'objet de rapports dans la littérature qui relatent des résultats plutôt médiocres, avec une forte proportion de résultats non conformes et des débits d'air souvent plus faibles que prévu [45]. Il existe également un réel écart entre les performances de ventilation prévues par la conception et la réglementation et les performances réelles de ventilation dans les bâtiments. En effet, les systèmes de ventilation des bâtiments sont souvent victimes de mauvaise mise en œuvre, mauvaise conception ou modification inadapté par les occupants.

En résumé, plusieurs recommandations pratiques sur la ventilation dans un contexte de pandémie virale ont été publiées pour certains types de bâtiments, et sont très utiles sur le terrain. Néanmoins, il subsiste un manque de précision dû à une connaissance insuffisante de la manière dont sont définies les " bonnes conditions de ventilation ", et des divergences de recommandation sur l'intensité de l'aération à mettre en place.

1.3 Estimation du risque d'infection

Le risque d'infection décrit quantitativement la probabilité d'infection d'une personne ou d'une population à une maladie infectieuse. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Il peut servir d'outil pour la modélisation des épidémies, les études paramétriques sur la transmission de l'épidémie ou, comme dans notre étude, pour l'évaluation de l'efficacité des mesures de freinage des contaminations [46].

Il existe deux principales méthodes d'évaluation du risque d'infection : le modèle Wells-Riley et le modèle Dose-Réponse.

Le modèle de Wells Riley est la méthode la plus simple et la plus largement utilisée. Elle provient de l'équation de Riley qui a été développée dans une étude épidémiologique sur la rougeole [47], et utilise le concept de « quantum d'infection » proposé par Wells [48], d'où son nom : équation de Wells-Riley. Le principe du quantum sert à considérer implicitement l'infectivité (probabilité pour chaque particule infectieuse d'initier l'infection), la force de la source infectieuse (le taux de génération de particules infectieuses), la décroissance biologique des agents pathogènes, etc [46]. Ce modèle repose sur une hypothèse forte : la répartition des aérosols infectieux est homogène (en concentration, en température et en pression) dans la zone considérée et stable dans le temps [49].

Le modèle Dose-Réponse est plus complexe et prend en compte davantage de paramètres : il peut notamment considérer d'autres voies de transmission du virus, en plus de la voie aérienne. À l'origine, les modèles dose-réponse étaient principalement utilisés pour l'évaluation des risques d'exposition aux produits chimiques dangereux. Ils ont ensuite été développés pour évaluer le risque d'infection des agents pathogènes d'origine alimentaire et hydrique, puis plus récemment, pour évaluer le risque d'infection des agents pathogènes transmissibles par voie aérienne [46]. Cependant, ils nécessitent de connaître des informations difficiles à estimer, comme la taille des particules infectieuses et l'infectivité. Dans le modèle de Wells-Riley, c'est le concept du quantum qui permet de se passer de la connaissance de ces informations.

Le quantum est une dose infectieuse hypothétique, elle est définie comme le nombre de particules infectieuses en suspension dans l'air nécessaires pour infecter une personne. Sa valeur est en général estimée en utilisant des données connues après une épidémie sur des cas spécifiques (en utilisant l'Équation 2 avec q comme inconnue). Dans le cas de l'épidémie de Covid19, une étude de Buannano et al [50] propose une nouvelle manière d'estimer les taux de quanta émis par une personne infectée. Ils dépendent de la charge virale dans la bouche, du type d'activité oral (respirer,

parler...), d'un paramètre physiologique respiratoire (la taux d'inhalation), et de l'activité physique (repos, debout, exercice) du sujet infecté.

Les particules de virus sont supposées être distribuées de manière homogène dans la zone étudiée et ceci rapidement après avoir été émises. La probabilité d'infection P d'un individu se calcule alors sur la base de la distribution de Poisson [49], à partir du nombre de quanta μ qu'il reçoit :

$$P = 1 - e^{-\mu}$$

Équation 1

Il faut ajouter d'autres hypothèses pour établir l'équation de Wells-Riley sous sa forme la plus classique : on considère une zone où les personnes infectées expirent des doses à un rythme constant, où l'air est à l'état d'équilibre, c'est-à-dire que la concentration des doses ne changent pas avec le temps. Ainsi, l'équation s'écrit de la manière suivante :

$$N_c = S(1 - e^{-Iqpt/Q})$$

Équation 2

Avec N_c le nombre de personnes nouvellement infectées pendant le temps d'exposition t [h], S le nombre de personnes qui peuvent potentiellement être infectées dans la pièce étudiée (c'est-à-dire le nombre de personnes présentes dans la pièce), I le nombre de personnes qui émettent des particules infectieuses dans la pièce, q [quanta.h⁻¹] le taux de quanta produit dans la pièce par une personne infectée, p [m³.h⁻¹] le volume d'air inspiré par personne et Q [m³.h⁻¹] le débit de ventilation dans la pièce examinée.

Ainsi, de nombreuses études utilisent ce modèle pour calculer le risque d'infection [25], [27], [50], [51].

Des outils ont également été développés pour faciliter le calcul du risque d'infection dans une pièce à partir de ces caractéristiques. Nous en avons relevé en particulier cinq :

- Le calculateur REHVA [52] : il s'agit d'un calculateur européen, monozone, qui utilise l'équation de Wells-Riley. Il se concentre sur la transmission du virus par voie aérienne. Il prend en compte un coefficient de déposition du virus, un coefficient de décroissance du virus, et même un coefficient de filtration pour simuler la présence d'un filtre HVAC ou Hepa. Cet outil a été testé dans plusieurs lieux dont : un openspace, un bureau de deux personnes, une salle de réunion, une salle de classe et des restaurants.
- Un calculateur développé par l'université du Colorado [27] : il s'agit également d'un outil monozone basé sur l'équation de Wells-Riley. Il étudie la transmission par voie aérienne et fait l'hypothèse d'homogénéité de l'air dans la zone. Il prend en compte de nombreux facteurs comme l'utilisation de masque ou de filtre HEPA. Il existe 12 catégories dans le modèle d'émissions suivant l'activité physique et orale des personnes infectées. Ce modèle est mis à disposition sous la forme d'un tableur Excel à compléter. Il a été testé sur de nombreux cas très variés dont : une classe, le métro, un supermarché, un stade, la chorale Skagit choir, un bus, un meeting politique etc.
- Airborne.cam [53] : cet outil britannique est également destiné à la modélisation monozone, mais celui-ci utilise le modèle dose-réponse. L'émission des particules n'est pas représentée en quanta mais en terme de charge virale, de nombre de copies du virus. Elle dépend de la vitesse de l'air, de la taille des particules et de la charge virale, selon la méthode développée dans l'article [54]. Il permet aussi de modéliser l'utilisation de différents types de masques (FFP2, masque chirurgical, masque en tissu simple ou triple épaisseur) et différents filtres (HEPA, ePM1, ePM2,5, ePM10, ISO coarse). Une salle classe a fait l'objet du test de cet outil.

- FATIMA (Fate and Transport of Indoor Microbiological Aerosols)[55] : c'est un outil web développé par le NIST. Il est simple d'utilisation. Il se concentre uniquement sur la transmission aéroportée du virus et sur une seule zone desservie par un système de ventilation mécanique. Il permet d'inclure l'entrée ou la sortie d'air par un système de ventilation par extraction, insufflation ou double flux. L'émission des particules peut être continue (respiration) ou intermittente (toux). Les simulations peuvent être lancées sur une période de 24h. Les résultats en sortie fournissent l'historique en fonction du temps de la concentration d'aérosols, ainsi que l'exposition cumulée d'un potentiel occupant.
- Un deuxième calculateur REHVA adapté au multizone [56] : REHVA a récemment développé un deuxième calculateur qui est cette fois spécifique à l'étude multizone. Il se base sur le modèle de Wells-Riley, c'est-à-dire qu'il fait l'hypothèse d'homogénéité de l'air et utilise le principe du quanta. Il étend le modèle monozone au multizone avec des circulations d'air possibles entre les pièces, à travers le système CVC et les zones communes du bâtiment (couloir, toilettes et escaliers). L'air est extrait vers l'extérieur via des bouches d'extraction. Cet outil a quelques limites, par exemple, le taux de ventilation doit être constant durant toute la journée et il ne peut y avoir qu'une seule zone toilette, une seule zone couloir et une seule zone escalier.

Dans la littérature, la plupart des études se focalise uniquement sur la zone où le virus est émis par la personne infectée. L'impact de la propagation des aérosols du SARS-CoV-2 dans les bâtiments à plusieurs zones reste inexploré [51]. Un des seuls articles proposant une étude multizone dans la littérature est l'article de Pease et al. [51]. Ils évaluent les concentrations et les probabilités d'infection pour les sources d'exposition intérieures et extérieures du bâtiment, à l'aide d'un modèle basé sur l'hypothèse d'homogénéité de l'air, dans un bâtiment à plusieurs pièces desservies par un système central de traitement de l'air (sans conditionnement d'air terminal) [51].

1.4 Objectifs de notre étude

L'objectif de ce travail est d'illustrer, au moyen d'une étude de cas, l'importance de la qualification des performances de la ventilation, afin de prévenir les épidémies de SARS-CoV-2 ou d'autres virus, et de comprendre les interactions entre les flux d'air passant par les fenêtres, par les défauts de perméabilité situés entre les différentes zones et par les composants de ventilation. Ainsi, l'étude ne se limitera pas à la pièce où les particules de virus sont émises mais s'intéressera à l'ensemble du bâtiment.

Dans de nombreux bâtiments d'Europe occidentale, comme les résidences, les écoles, les bureaux, etc., la ventilation de l'ensemble du bâtiment est conçue selon une approche multizone, avec des flux d'air circulant entre les pièces. Ces systèmes de ventilation sont classés en trois catégories : ventilation double-flux, ventilation simple flux par extraction, ventilation simple flux par insufflation. Ils fonctionnent tous sur le même principe : ventiler des zones les moins polluées vers les zones les plus polluées, généralement les pièces humides : toilettes, salles de bains et cuisines.

En théorie, la ventilation mécanique des systèmes simple flux dans les habitations fonctionnent sur le principe suivant : les bouches d'extraction d'air évacuent l'air dans les pièces humides. Dans les chambres et les salles de vie comme le séjour, il y a des grilles d'entrée d'air qui permettent à l'air extérieur de rentrer (Figure 3a).

Néanmoins, il existe des défauts d'étanchéité sur les murs extérieurs. Lorsqu'ils sont importants dans les pièces les plus humides, alors l'air extérieur peut entrer directement dans ces pièces, en

contournant les chambres, ce qui conduit donc les chambres à être sous ventilées (chambres de la Figure 3b). L'ouverture des fenêtres amplifie cette perturbation des circuits aérauliques théoriques.

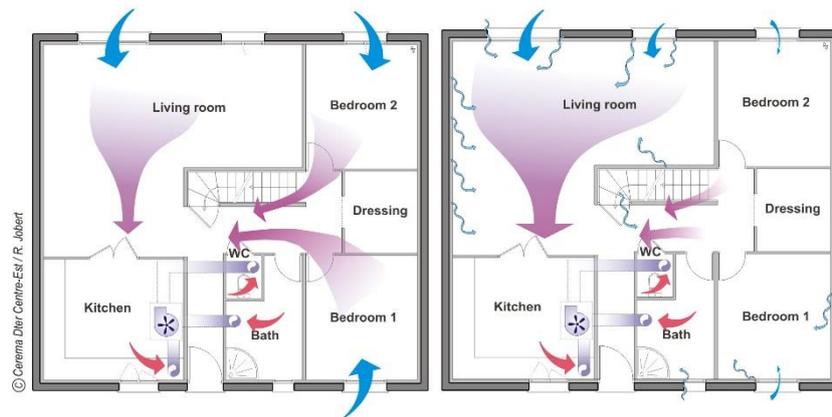


Figure 3 : a) Flux d'air théoriques dans un logement, b) Flux d'air réels dû aux défauts de perméabilités [57]

Le contexte pandémique soulève deux questions cruciales :

- Premièrement, quels sont les impacts d'une ventilation conçue pour créer des flux d'air circulant des zones généralement les moins polluées (chambres, salons, bureaux, salles de classe) aux zones généralement les plus polluées (salles de bain, toilettes, cuisine), lorsqu'une zone habituellement peu polluée devient une zone hautement contaminée ?
- Deuxièmement, quel est l'impact de la recommandation généralisée de l'ouverture des fenêtres sur les flux de ventilation et, plus largement, sur l'exposition aux particules contaminés des occupants du bâtiment ? Il faudra considérer les risques d'infection de l'ensemble des occupants du bâtiment, pas seulement ceux se situant dans la pièce d'émission des particules de virus.

Afin de répondre à ces deux questions, nous modélisons dans cette étude la distribution des flux d'air due à l'ouverture des fenêtres dans une maison individuelle et dans un appartement où les familles sont isolées dans un contexte de pandémie tel que Covid-19. Le transport d'un virus aérosolisé est simplifié par la modélisation du mouvement des particules contaminées.

Nous nous concentrerons sur les flux d'air entre les pièces du logement présentant des concentrations élevées en particules virales, ce qui nous permettra d'évaluer l'exposition des occupants à l'aérosol contaminé, et d'estimer leur risque d'infection.

Afin d'étudier la sensibilité des résultats, nous testons trois systèmes de ventilation : un système double-flux à débits constants, un système simple flux par extraction à débits constants et un système simple flux à débits d'air variables hygroréglable, ainsi que différentes stratégies d'ouverture de fenêtres et portes.

2. Méthode

2.1 Présentation des cas d'étude

Cette étude s'intéresse à deux cas de bâtiment résidentiel : une maison individuelle et un appartement.

2.1.1 Les bâtiments

La maison individuelle

Le premier bâtiment étudié est une maison individuelle basse consommation en brique, située en Savoie. Cette maison a fait l'objet de plusieurs études et mesures qui permettent de connaître précisément son comportement d'étanchéité à l'air et son système de ventilation [58]. Elle est composée de 11 pièces qui se répartissent sur deux niveaux, et forment un volume total chauffé de 337m². Le plan de la Figure 4 montre la répartition des différentes pièces : quatre chambres (BR1, BR2, BR3, BR4), deux salles de bain (Bath1 et Bath2), deux WC (Wc1 et Wc2), une mezzanine (Mezz), une cuisine ouverte sur le salon (K+LR) et un hall.

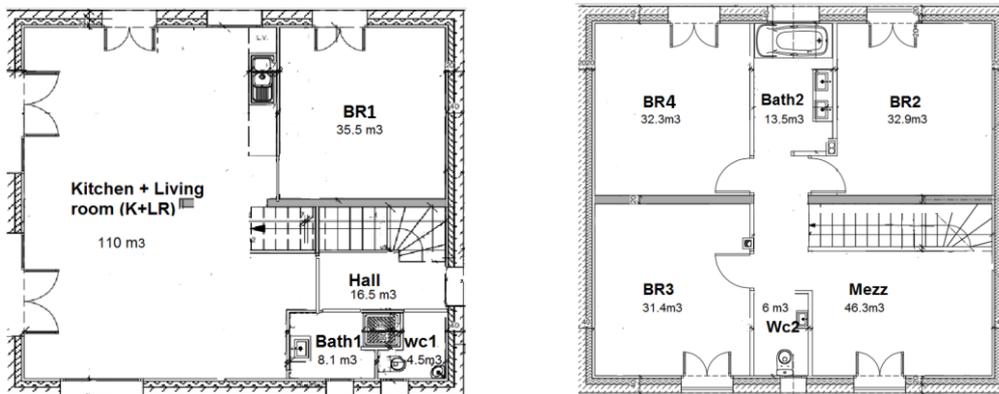


Figure 4: Plan de la maison individuelle, rez-de-chaussée (à gauche) et 1^{er} étage (à droite)

L'appartement

Le deuxième cas d'étude est un appartement issu d'un bâtiment basse consommation, situé en région parisienne. Ce bâtiment a fait l'objet de mesure à sa réception dans le cadre d'un projet de recherche pour le compte de l'ADEME, le « Projet Performance ». Il abrite des logements locatifs allant du studio au T5, répartis sur 8 étages.

Dans cette étude nous nous intéresserons particulièrement à un des appartements du bâtiment, qui sera nommé « logement de référence » (ou app. R). Il s'agit d'un appartement T4 situé au cinquième étage. Le choix de ce logement parmi les autres logements du bâtiment s'est basé sur trois critères : nous disposons des résultats de mesures (notamment d'étanchéité à l'air) réalisées pour ce logement, et la modélisation de l'environnement de ce logement est simplifiée par le fait qu'il n'y est que deux logements voisins au même étage et que ses logements voisins, aux étages supérieurs et inférieurs (4^{ème} et 6^{ème} étages), lui sont identiques.

En effet, son voisinage se compose de 4 autres appartements disposés tels que sur la Figure 5: deux appartements identiques, le T4 en-dessous (app. D), et le T4 au-dessus (app. U), ainsi que deux appartements au même étage, le T3 au sud (app. S), et le T3 à l'est (app. E). Au sud-ouest, on retrouve les parties communes (EC) du bâtiment.

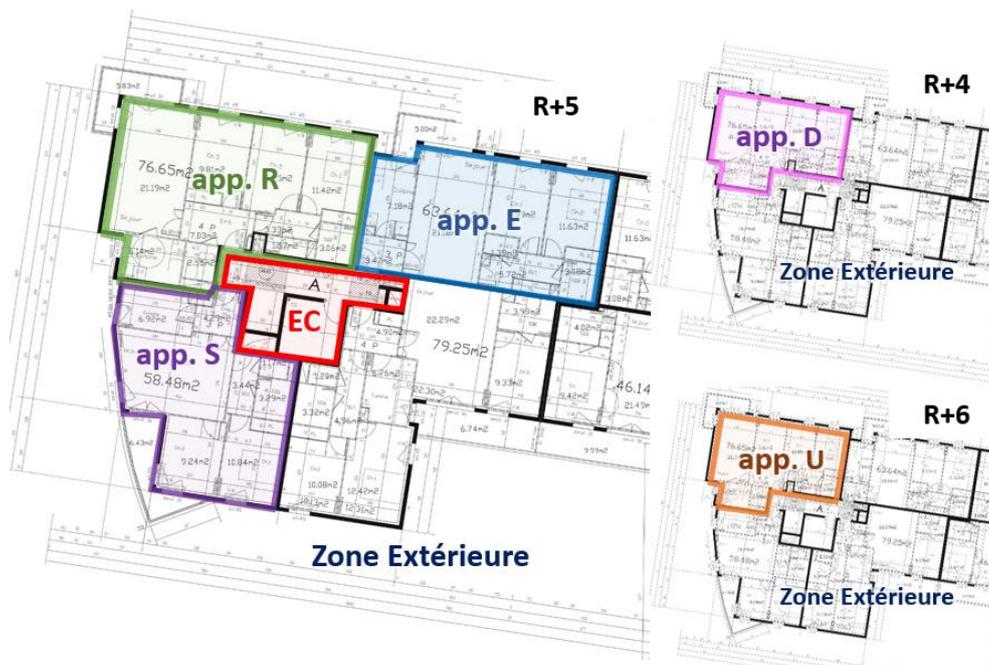


Figure 5 : Plan du bâtiment

L'appartement de référence (app. R) est divisé en 10 pièces, voir Figure 6 : un séjour (LR), une cuisine séparée (K), trois chambres (BR1, BR2, BR3), une entrée (hall), un couloir (corr), une salle de bain (Bath1), une salle d'eau (Bath2) et des WC. Le volume total chauffé est de 197 m³.

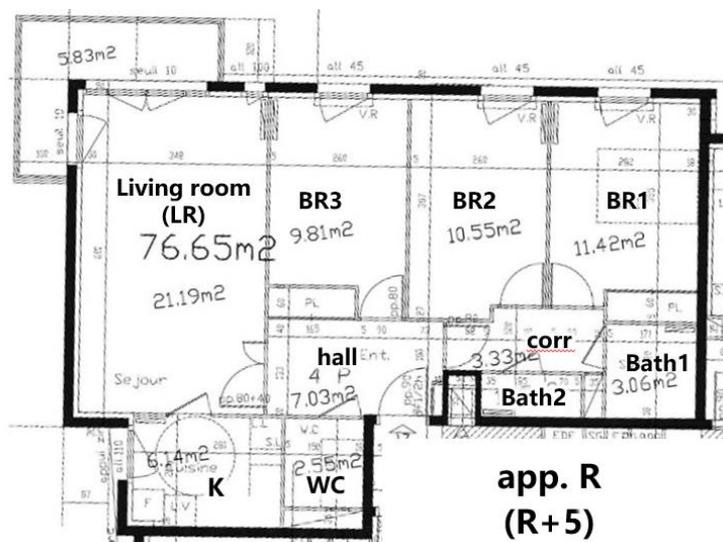


Figure 6: Plan appartement de référence

Les plans des appartements voisins sont disponibles en Annexe 1 : Plans des appartements voisins du logement de référence du bâtiment collectif étudié.

2.1.2 Les occupants

Nous faisons l'hypothèse que, dans chaque logement, deux habitants vivent dans la chambre parentale (BR2 dans l'appartement, BR4 dans la maison) et un habitant dans chaque autre chambre. Ainsi, la maison individuelle loge cinq occupants, et les appartement T4 et T3 logent respectivement quatre et trois occupants. Tous les occupants sont confinés dans leur logement dans un contexte de pandémie tel que le celui engendré par le Covid-19.

Dans chaque cas d'étude, un des occupants est infecté et est mis en quarantaine dans sa chambre, il s'agit des occupants des chambres BR1 de la maison individuelle et de la chambre BR1 du logement de référence du bâtiment collectif. Il reste dans cette pièce toute la journée, à l'exception de 40 minutes dans la salle de bain (Bath1) le soir (Tableau 3 et Tableau 4).

Concernant la répartition du temps passé dans les différentes pièces pour les autres occupants, nous utilisons les données détaillées de la campagne nationale française sur la QAI des logements de 2005 [33] basé sur un échantillon représentatif de la population et incluant 567 logements et 1612 occupants. Selon ces données, en temps normal, chaque jour, une personne passe en moyenne environ 5h30 dans la cuisine ou le salon, 40 min dans la salle de bain, 9h20 dans une chambre et 7h50 à l'extérieur. Dans le contexte particulier du confinement, nous supposons que le temps habituellement passé à l'extérieur est transposé dans une pièce particulière pour chaque habitant. Il pourra par exemple y travailler, étudier ou se reposer. Ainsi, pour chaque logement, la plupart des occupants restent seuls dans la chambre dans laquelle ils dorment le soir, et un des occupants de la chambre parentale s'installe dans la cuisine pour être seul (Tableau 1, Tableau 2 et Tableau 3). Les horaires d'occupation sélectionnés pour les occupants sont présentés dans les Tableau 3 et Tableau 4.

Tableau 1 : Pièces principales des occupants de la maison individuelle

Numéro de l'occupant	Nom	Pièce principale jour	Pièce principale nuit
1	Mère	BR4	BR4
2	Père	LR+K	BR4
3	Enfant1	BR2	BR2
4	Enfant2	BR3	BR3
5	Contaminé	BR1	BR1

Tableau 2 : Pièces principales des occupants du bâtiment collectif

Numéro de l'occupant	Nom_Appartement	Pièce principale jour	Pièce principale nuit
1	Enfant2_U	BR3	BR3
2	Père_U	K	BR2
3	Mère_U	BR2	BR2
4	Enfant1_U	BR1	BR1
5	Enfant_E	BR1	BR1
6	Père_E	K	BR2
7	Mère_E	BR 2	BR2
8	Enfant_R	BR3	BR3
9	Père_R	K	BR2
10	Mère_R	BR2	BR2
11	Contaminé_R	BR1	BR1
12	Enfant_S	BR2	BR2
13	Père_S	K	BR1
14	Mère_S	BR1	BR1
15	Père_D	K	BR1
16	Mère_D	BR2	BR2
17	Enfant2_D	BR3	BR3
18	Enfant1_D	BR1	BR1

Tableau 3 : Horaires d'occupation des pièces par habitant pour une journée type dans la maison individuelle

Occupant	Pièce à vivre	Salle de bain	Chambre
1 Mère	7h00 – 8h30 12h00 – 14h00 19h00 – 21h00	Bathroom1 6h20 – 7h00	BR4 21h00 – 6h20 8h30 – 12h00 14h00 - 19h00
2 Père	6h20 – 7h00 7h40 – 21h00	Bathroom1 7h00 – 7h40	BR4 21h00 – 6h20
3 Enfant1	6h20 – 8h30 12h00 – 14h00 19h00 – 20h20	Bathroom1 20h20 – 21h00	BR2 21h – 6h20
4 Enfant2	6h20 – 8:30 12h00 – 14h00 19h00 – 19h40 20h20 – 21h00	Bathroom2 19h40 – 20h20	CH3 21h00 – 6h20
5 Contaminé		WC 20h20-21h00	BR1 21h00 -20h20

Tableau 4 : Horaires d'occupation des pièces par habitant pour une journée type dans le logement de référence du bâtiment collectif

Occupant_ appartement	Salon	Cuisine	Salle de bain	Chambre
1 Enfant2_U	6h35 – 8h30 12h30 – 14h00 19h00 – 20h20	6h20 – 6h35 12h00 - 12h30 19h00 – 19h40	Bathroom2 20h20 – 21h00	BR3 8h30 - 12h00 14h00 – 19h00 21h – 6h20
2 Père_U	7h00 – 8h30 12h30 – 14h00 19h40 – 21h00	8h30 – 12h30 14h00 -19h40	Bathroom1 6h20 – 7h00	BR2 21h00 – 6h20
3 Mère_U	6h35 – 7h00 7h40 – 8h30 19h40 - 21h00	6h20 – 6h35 12h00 – 12h30 19h00 – 19h40	Bathroom1 7h00 – 7h40	BR2 8h30 - 12h00 12h30 – 14h00 21h00 – 6h20
4 Enfant1_U	6h35 – 8h30 12h30 – 14h00 19h00 – 20h20	6h20 – 6h35 12h00 – 12h30 19h00 – 19h40	Bathroom1 20h20 – 21h00	BR1 21h – 6h20
5 Enfant_E	6h35 – 8h30 12h30 – 14h00 19h00 – 20h20	6h20 – 6h35 12h00 – 12h30 19h00 – 19h40	Bathroom 20h20 – 21h00	BR2 21h – 6h20
6 Père_E	7h00 – 8h30 12h30 – 14h00 19h40 – 21h00	8h30 – 12h30 14h00 -19h40	Bathroom 6h20 – 7h00	BR1 21h00 – 6h20
7 Mère_E	6h35 – 7h00 7h40 – 8h30 19h40 - 21h00	6h20 – 6h35 12h00 – 12h30	Bathroom 7h00 – 7h40	BR1 8h30 - 12h00 12h30 – 14h00 21h00 – 6h20
8 Enfant_R	6h35 – 8h30 12h30 – 14h00 19h00 – 20h20	6h20 – 6h35 12h00 - 12h30 19h00 – 19h40	Bathroom2 20h20 – 21h00	BR3 8h30 - 12h00 14h00 – 19h00 21h – 6h20
9 Père_R	7h00 – 8h30 12h30 – 14h00 19h40 – 21h00	8h30 – 12h30 14h00 - 19h40	Bathroom1 6h20 – 7h00	BR2 21h00 – 6h20
10 Mère_R	6h35 – 7h00	6h20 – 6h35	Bathroom1	BR2

		7h40 – 8h30 19h40 - 21h00	12h00 – 12h30 19h00 – 19h40	7h00 – 7h40	8h30 - 12h00 12h30 – 14h00 21h00 – 6h20
11	Contaminé_R			WC 20h20 - 21h00	BR1 21h00 -20h20
12	Enfant_S	6h35 – 8h30 12h30 – 14h00 19h00 – 20h20	6h20 – 6h35 12h00 – 12h30 19h00 – 19h40	Bathroom 20h20 – 21h00	BR2 21h – 6h20
13	Père_S	7h00 – 8h30 12h30 – 14h00 19h40 – 21h00	8h30 – 12h30 14h00 -19h40	Bathroom 6h20 – 7h00	BR1 21h00 – 6h20
14	Mère_S	6h35 – 7h00 7h40 – 8h30 19h40 - 21h00	6h20 – 6h35 12h00 – 12h30 19h00 – 19h40	Bathroom 7h00 – 7h40	BR1 8h30 - 12h00 12h30 – 14h00 21h00 – 6h20
15	Père_D	6h35 – 8h30 12h30 – 14h00 19h00 – 20h20	6h20 – 6h35 12h00 - 12h30 19h00 – 19h40	Bathroom2 20h20 – 21h00	BR3 8h30 - 12h00 14h00 – 19h00 21h00 – 6h20
16	Mère_D	7h00 – 8h30 12h30 – 14h00 19h40 – 21h00	8h30 – 12h30 14h00 -19h40	Bathroom1 6h20 – 7h00	BR2 21h00 – 6h20
17	Enfant2_D	6h35 – 7h00 7h40 – 8h30 19h40 - 21h00	6h20 – 6h35 12h00 – 12h30	Bathroom1 7h00 – 7h40	BR2 8h30 - 12h00 12h30 – 14h00 21h00 – 6h20
18	Enfant1_D	6h35 – 8h30 12h30 – 14h00 19h00 – 20h20	6h20 – 6h35 12h00 – 12h30 19h00 – 19h40	Bathroom1 20h20 – 21h00	BR1 21h – 6h20

2.1.3 Les émissions d'humidité et de CO₂

En respirant, les occupants émettent en continu du CO₂ et de l'humidité. Ces émissions sont prises en compte dans notre modèle suivant l'état de l'occupant : éveillé ou endormi. Les occupants sont considérés éveillés entre 6h20 et 21h00, et endormis le reste du temps, les valeurs d'émission suivantes sont introduites pour le CO₂ [59] [60] et l'humidité[61]:

Etat de l'occupant	CO ₂ [L.h-1/occupant]	Humidité [g.h-1/occupant]
Eveillé	18	55
Endormi	15	40

Trois autres sources d'humidité sont ajoutées au modèle :

- L'humidité liée aux douches quotidiennes des habitants dans les salles de bain et salle d'eau
- L'humidité provenant de la confection des repas dans la cuisine
- L'humidité des machines à laver le linge, durant le lavage et le séchage

Voici, les données préconisées par le modèle, converties en g/s.[62]

	Taux d'émission [g/s]	Durée d'émission
Douche	0,4	10 minutes par occupant chaque jour

Cuisine	0,4	15 minutes pour le petit-déjeuner
	0,63	30 minutes pour le déjeuner
	0,72	40 minutes pour le diner
Linge	0,038	2 heures de lavage par occupant chaque semaine
	0,07	11 heures de séchage par occupant chaque semaine

2.2 Modélisation

2.2.1 Approche multizone

Dans cette étude, nous utiliserons le logiciel de modélisation numérique CONTAM. Il s'agit d'un logiciel de simulation aéraulique libre de droit. Il permet de déterminer les différents flux d'air, les concentrations de particules dans les bâtiments ainsi que les expositions des occupants [63]. Il est largement utilisé dans la littérature pour des études telles que l'analyse des performances de qualité de l'air intérieur, la gestion des flux de ventilation ou encore la propagation de fumées. La validation de ces modèles multizone est bien documentée et a été comparée avec des résultats expérimentaux [64], [65].

Plusieurs auteurs ont déjà montré que ce type de modèle, qui fait l'hypothèse d'homogénéité de l'air dans chaque pièce, est adapté à la modélisation de la ventilation et l'analyse de la QAI [64], [65]. Chaque pièce du bâtiment est modélisée comme une zone d'air homogène. La température est supposée constante et est maintenue à 20°C, par le système de chauffage, pendant toute la période de la modélisation.

Le logiciel fait partie de la catégorie des codes en pression, c'est-à-dire qu'il calcule pour chaque zone la pression de référence en se basant sur la loi de conservation de la masse et les calculs de débits d'air.

L'équation de bilan de masse est écrite sur chaque zone de la façon suivante :

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = \sum_j q_{i,j} + q_{V,i} = 0$$

Équation 3

Avec m_i la masse [kg] du volume contrôlé de la zone i ; $q_{i,j}$ le débit massique [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$] d'air entrant ou sortant de la zone i par les défauts de perméabilités des murs, les détalonnages des portes et les composants passifs (entrées d'air sur les murs extérieurs) depuis toutes les zones adjacentes j (dont le milieu extérieur) ; $q_{V,i}$ le débit d'air [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$] extrait ou insufflé par le système de ventilation mécanique dans la zone i .

On appelle « volume contrôlé » le volume qui contient un mélange d'air et de polluants supposé homogène en concentration, en température et en pression. Il est défini pour chaque zone à partir de sa surface au sol et de la hauteur de la zone.

Les débits d'air passant à travers les orifices des parois, correspondants aux défauts de perméabilité, sont calculés à l'aide de la loi puissance à partir de la différence de pressions entre les deux zones et des caractéristiques des défauts :

$$q_{i,j} = \rho_i C_{i,j} \Delta P_{i,j}^n$$

Équation 4

Avec ρ_i est la densité de l'air dans la zone d'origine i [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], $C_{i,j}$ le coefficient de perméabilité à l'air du défauts d'étanchéité [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-n}$], $\Delta P_{i,j}$ la différence de pression entre les zones i et j [Pa], et n l'exposant caractéristique de l'écoulement, chiffre compris entre 0.5 et 1 [-].

Les pressions de chaque zone dépendent des différences de densité de l'air (tirage thermique, basé sur l'équation d'équilibre hydrostatique). L'équation nécessite la prise en compte de la pression sur les façades des zones en contact avec l'extérieur, qui est liée à la pression induite par le vent, de la manière suivante :

$$P_{v,i} = \frac{1}{2} \rho_{out} c_{p,i} v_{build}^2$$

Équation 5

Avec $P_{v,i}$ la pression du vent sur la façade extérieure considérée, celle de la zone i , ρ_{out} la densité de l'air extérieur, $c_{p,i}$ le coefficient de pression du vent [-], and v_{build} la vitesse du vent au niveau du bâtiment [$m.s^{-1}$].

Une fois les débits d'air connus, les concentrations de polluants sont obtenues en calculant le transport de polluants dû aux flux d'air, puis le bilan massique pour chaque zone.

2.2.2 Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées sont des données dynamiques typiques de deux semaines d'hiver à Lyon, France, pour la maison individuelle et à Paris, France, pour le bâtiment collectif. Le pas de temps est de 10 minutes. La simulation se déroule de 00h00 le 1er janvier à 00h00 le 16 janvier, représentant 360 heures simulées. Ainsi, des conditions météorologiques hivernales pendant un confinement de 2 semaines sont simulées.

Le fichier météorologique à fournir dans CONTAM est un fichier météo au format WTH. Il contient les données extérieures de température, de pression, de vitesse et direction du vent ainsi que d'humidité relative. Les fichiers météo sont tirés des données provenant de l'ASHRAE (ASHRAE IWEC Weather file, 2001, Tableau 5 et Tableau 6) [66], puis converties au format WTH à l'aide d'un logiciel du NIST nommé CONTAM Weather Creator.

	Température (K)	Pression (Pa)	Vitesse du vent ($m.s^{-1}$)	Direction du vent (°)	Humidité relative (g/kg)
Valeur médiane	276.2	100400	2.5	160	4.2
1er quartile	274.2	100100	1.5	120	3.8
3eme quartile	280.2	100800	4.1	220	5.1

Tableau 5: Caractéristiques des données météorologiques à Lyon durant la période étudiée

	Température (K)	Pression (Pa)	Vitesse du vent ($m.s^{-1}$)	Direction du vent (°)	Humidité relative (g/kg)
Valeur médiane	283.3	99500	3.4	140	6.0
1er quartile	279.75	98900	2.1	120	5.1
3eme quartile	286.6	100500	4.4	180	6.5

Tableau 6: Caractéristiques des données météorologiques à Paris durant la période étudiée

La vitesse du vent, est extraite de données météorologiques relevées à une hauteur de 10 m dans une zone ouverte, par conséquent elle doit être recalculée pour l'adapter aux sites de l'étude. Pour cela, une loi de puissance est appliquée avec des facteurs spécifiques à une zone suburbaine. Les coefficients de pression de la norme EN 15242 sont utilisés, en supposant l'absence de barrières, c'est-à-dire +0,5 sur les façades au vent et -0,7 sur les façades sous le vent.

2.2.3 Distribution des défauts de perméabilité

En pratique, les défauts d'étanchéité sont partout dans les bâtiments (autour des fenêtres, des composants électriques, des fissures, etc.) [67]. Afin de simplifier cette distribution complexe, les défauts d'étanchéité sont modélisés dans CONTAM par un orifice au centre de chaque cloison externe et interne de chaque zone, en utilisant la loi de puissance (Équation 4).

Maison individuelle

Pour les murs extérieurs, les données provenant des mesures détaillées prises sur chaque mur de la maison sont disponibles, elles sont alors directement exploitées dans notre modélisation avec l'Équation 4. Concernant les parois internes, la distribution des défauts de perméabilité sur chaque paroi i de notre modèle suit une distribution interne non uniforme (cas d4) proposée dans l'étude [58] qui se base sur une campagne menée sur 23 maisons. Elle propose de créer une distribution de $(q_{50i})_{0 < i \leq \text{nombre_de_parois}}$ avec les caractéristiques suivantes : une valeur médiane (q_{50}) de $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ et intervalle interquartile (q_{50}) de $12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, où les valeurs q_{50i} correspondent pour chaque paroi au débit de fuite à la pression différentielle 50 Pa normalisé par la surface de cette paroi déperditive. En multipliant ces valeurs par les surfaces déperditives S_i une distribution de Q_{50} , débit de fuite à la pression différentielle 50 Pa en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ est obtenue. Ainsi, pour calculer le coefficient de perméabilité à l'air du défauts d'étanchéité C_i [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$], on utilise la formule suivante :

$$C_i = \frac{Q_{50}}{50^n} * \frac{1}{3600}$$

Équation 6

Bâtiment collectif

Pour les murs extérieurs du bâtiment collectif, nous utilisons également des données provenant de mesures sur site. En effet la perméabilité de chaque logement a été mesurée à la réception du bâtiment. Ne disposant pas du détail pour chaque paroi, il faudra considérer qu'elle est homogène sur toutes les parois extérieures de chaque logement. Pour les parois internes à un même logement, nous prenons la valeur de q_{50} proposée par [58] : $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

Il faut également introduire des défauts d'étanchéité entre les parois séparant les différents logements du bâtiment. En effet, très peu d'études (à notre connaissance) ont examiné la façon dont les particules se déplacent entre les appartements d'un même immeuble.

Une étude a porté sur le mouvement de la fumée de tabac secondaire entre 19 appartements de quatre immeubles collectifs au Danemark [68]. Elle a montré qu'en ce qui concerne les particules ultrafines ($< 0,1 \mu\text{m}$), environ 9 % étaient transférées lorsque l'appartement source était situé en dessous de l'appartement récepteur non source, et 1 à 2 % lorsque les appartements étaient situés au même étage. Une autre étude de la même équipe [69] a caractérisé un transfert de 14% d'un gaz traceur (quantifiant le transfert d'air), et de 4% de particules ultrafines ($< 0,1 \mu\text{m}$), via les défauts d'étanchéité à l'air d'une surface de plancher délimitant deux appartements.

Bohac et al. [70] ont étudié six immeubles résidentiels collectifs aux États-Unis, pour lesquels les valeurs médianes des débits d'air provenant d'appartements adjacents ont été caractérisées dans la plage [2-35%] du débit d'air total dans l'unité, et la fuite d'air interne médiane vers les appartements adjacents a représenté 27% de la fuite d'air totale de l'unité.

Les fuites d'air entre les appartements dans les bâtiments résidentiels collectifs ont été signalées comme représentant entre 12 et 33 % des fuites d'air totales à 50 Pa, dans une étude suédoise [71].

Dans une étude expérimentale menée sur 6 appartements dans 4 bâtiments résidentiels collectifs situés au Québec, Canada, les auteurs ont mesuré des fuites d'air internes de 19%-22%-34%-64%-65%-67% de la fuite d'air totale de l'appartement [72]. Plus précisément, ils ont caractérisé la proportion entre les appartements adjacents et les zones communes/halls. Ces dernières parois sont plus étanches, représentant respectivement 11%-n/a-32%-46%-37%-52% de la fuite d'air totale de l'appartement.

Une dernière étude propose une distribution de valeurs à fournir au modèle concernant les débits de fuite à la pression 50 Pa (q_{50}) pour chaque type de mur séparant deux parties d'un bâtiment d'habitation collectif. Il s'agit des données de l'étude de Lozinsky et Touchie [73] qui est basée sur des tests récents de fuites d'air interzonales effectués dans 12 bâtiments collectifs nouvellement construits au Canada.

En conclusion, après avoir analysé l'ensemble de ces données issues de la littérature, les données que nous utiliserons dans notre modélisation sont calculées à partir des proportions de q_{50} proposées par la dernière étude [73] et de la valeur de la perméabilité globale du bâtiment mesurée à sa réception. Ainsi, les valeurs du modèle sont les suivantes : $q_{50} = 0,504 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ pour les plafonds et les planchers ; $q_{50} = 0,252 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ pour les murs verticaux entre deux logements voisins ; et $q_{50} = 14,44 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ pour les murs donnant sur le couloir commun du bâtiment. Il est à noter que ces valeurs sont assez faibles, notre étude tend donc à minimiser la circulation du virus par les défauts de perméabilité entre les logements.

2.2.4 Systèmes de ventilation

Pour chacun des cas d'études, le bâtiment modélisé est supposé équipé d'un des trois systèmes de ventilation : un système de ventilation double flux auto-réglable, un système de ventilation simple flux auto-réglable et un système de ventilation simple flux à débits variables de type hygroréglable.

- Les systèmes simple flux se composent de bouches d'extractions d'air situées dans les zones humides comme la cuisine, les toilettes ou la salle de bains, et des entrées d'air, situées dans les pièces de vie et les chambres. L'air vicié est extrait par un caisson de ventilation pour être rejeté à l'extérieur. Ainsi, un flux d'air par dépression est créé dans le bâtiment.
- Les systèmes double flux sont quant-à-eux constitués de bouche d'extraction d'air et également de bouches d'insufflation. Leur disposition dans le logement est semblable au cas simple flux, avec les entrées d'air des pièces de vie remplacées par des bouches de soufflage. Cette fois, le caisson de ventilation contrôle directement les débits d'air sortant mais aussi ceux d'air entrant.

De plus, il y a plusieurs façons de commander les débits d'extractions d'air : avec des bouches auto-réglables, les débits d'air ne dépendent pas des paramètres du milieu, ils sont constants quelle que soit la pression, alors que les bouches hygroréglables ajustent leurs débits en fonction de l'humidité ambiante.

Simple flux auto-réglable

Les valeurs des débits d'extraction du modèle sont celles fournies par la réglementation française [74]. La maison individuelle possède sept pièces avec deux salles de bain et deux WC séparés. Pour le cas d'étude du bâtiment collectif, les logements de types T4 (resp. T3) ont trois chambres (resp.

deux chambres), un salon et une cuisine séparée, deux salles de bain (resp. une salle de bain) et un WC. Aussi, dans chaque cas, la cuisine possède un débit de pointe qui peut être enclenché par les utilisateurs lors de la cuisson des aliments. Nous considérerons qu'il est enclenché deux fois par jour pendant une heure : de 12h00 -13h00 et 19h00-20h00.

Les débits à extraire sont donc les suivants :

Maison individuelle	Zone	Q (m3/h)	Qpointe (m3/h)
	Cuisine	45	135
	WC	30	
	SDB	15	
	SDE	15	

Tableau 7 : Débit des bouches d'extraction du système auto-réglable Maison individuelle

Numéro appartement	Zone	Q (m3/h)	Qpointe (m3/h)
app 17 (T4) app 13 (T4) app 21 (T4)	Cuisine	45	120
	WC	30	
	SDB	30	
	SDE	30	
app 16 (T3) app 18 (T3)	Cuisine	45	105
	WC	15	
	SDB	30	

Tableau 8: Débit des bouches d'extraction du système auto-réglable Bâtiment collectif

Les bouches d'extraction d'air sont ainsi modélisées dans CONTAM par des éléments de type « supply » avec des emplois du temps adaptés.

Il faut aussi modéliser les bouches d'entrées d'air qui sont conçues pour équilibrer le débit total d'air extrait. Pour cela, on utilise les courbes de fonctionnement calculées avec les données fournies par le fabricant des bouches, pour ajuster la loi puissance (Équation 4) comme indiqué dans l'Équation 7.

$$q_{out,i} = \rho_{out} 4.79 \Delta P_{outdoor,i}^{0.53}$$

Équation 7

Avec ρ_{out} la densité de l'air extérieur [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] et $\Delta P_{outdoor,i}$ la différence de pression sur la façade entre l'extérieur et la zone i [Pa].

Double flux auto-réglable

De même que dans le cas du système de ventilation simple flux auto-réglable, les débits implémentés pour ce système de ventilation correspondent à ceux imposés par la réglementation française dans chacun des cas. Ainsi, les débits d'extraction sont identiques à ceux du système

précédent (Tableau 7 ; Tableau 8) et sont représentés dans CONTAM par des éléments de type « supply ».

Concernant les débits d'insufflation des bouches situées dans les pièces de vie, ils doivent respecter les règles suivantes : la somme des débits d'air insufflé est égale à la somme des débits d'air extrait et le salon a un débit deux fois supérieur à celui des chambres. Ensuite, il suffit d'introduire dans CONTAM des éléments nommés « return » qui correspondent au bouche d'insufflation.

Maison individuelle	Zone	Q (m3/h)	Qpointe (m3/h)
	Séjour	45	65
	Chambre 1	17,5	32,5
	Chambre 2	17,5	32,5
	Chambre 3	17,5	32,5
	Chambre 4	17,5	32,5

Tableau 9: Débit des bouches d'insufflation du système auto-réglable Maison individuelle

Numero appartement	Zone	Q (m3/h)	Qpointe (m3/h)
app 17 (T4) app 13 (T4) app 21 (T4)	Séjour	54	84
	Chambre 1	27	42
	Chambre 2	27	42
	Chambre 3	27	42
app 16 (T3) app 18 (T3)	Séjour	45	75
	Chambre 1	22,5	37,5
	Chambre 2	22,5	37,5

Tableau 10 : Débit des bouches d'insufflation du système auto-réglable Bâtiment collectif

Simple flux hygroréglable

Le système de ventilation hygroréglable ajuste les flux d'air extrait en fonction de la mesure directe de l'humidité relative (HR), grâce aux extensions et rétractions d'un textile hygroscopique modifiant la section des entrées et sorties. Dans notre étude de cas, le système de ventilation modélisé appartient à la gamme EasyHome hygro de la marque Aldes, il s'agit d'un système certifié par le CSTB qui dispose d'une documentation abondante[75]. L'analyse de l'avis technique [76] fournit les caractéristiques des éléments du système à modéliser :

- une bouche d'extraction hygroréglable dans la cuisine qui fournit un débit d'air compris entre 15 et 55 m³.h⁻¹ en temps normal, et qui peut atteindre un débit de pointe de 135 m³.h⁻¹ pendant 30 minutes lorsque l'utilisateur l'active ;
- une bouche d'extraction hygroréglable dans les salles de bains fournissant un débit d'air compris entre 5 et 45 m³.h⁻¹ ;
- une bouche d'extraction hygroréglable des toilettes qui évacue l'air avec un débit constant de 5 m³.h⁻¹ et qui peut être porté à 30 m³.h⁻¹ pendant 20 minutes grâce à un capteur d'occupation ;

- une entrée d'air hygroréglable dans chaque chambre et deux dans le salon, avec un débit de fonctionnement compris entre $4 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et $31 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ pour une pression de référence de 10 Pa. Elles ajustent leurs débits en fonction de l'humidité ambiante et de la différence de pression entre la zone intérieur et l'extérieur.

La modélisation de ce type de système de ventilation est plus complexe dans le logiciel CONTAM. Elle nécessite de créer des « super-éléments » qui représentent chacun des composants du système de ventilation. Ces super éléments correspondent à des blocs éditables ayant une entrée et une sortie. Ils seront par exemple utilisés dans notre étude pour agir comme une entrée d'air, en utilisant la mesure d'humidité relative dans la zone, qui est fournie dans CONTAM par un élément « sensor ». Les super-éléments utilisés ont été développés dans le cadre du travail de fin d'étude de B Poirier [77] pour la modélisation des systèmes de ventilation hygroréglable. Ils sont de six types différents :

- HR_sensor : il convertit l'humidité spécifique en humidité relative en utilisant la température du milieu de la pièce, il est utilisé dans les pièces contenant des bouches d'extraction d'air.
- HR_sensor_EA : il fournit l'humidité relative au niveau des entrées d'air hygroréglable, la valeur de la température y est différente de celle du milieu de la zone.
- B21 : il s'agit des bouches d'extraction des salles de bain, en entrée, elles prennent la valeur de l'humidité relative dans la pièce et en sortie elles délivrent le débit d'air extrait.
- C21 : les bouches d'extraction des cuisines agissent sur le même principe que celles des salles de bain, mais prennent en compte le débit de pointe activable par l'utilisateur.
- EA_HR : les entrées d'air hygroréglable prennent également la valeur d'humidité relative en entrée, puis elles utilisent une équation différente pour calculer le débit d'air en sortie.
- W13 : le super élément WC est le plus simple, l'entrée est la variable booléenne présence ou absence, en sortie, il fournit le débit maximum en cas de présence.

2.2.5 Portes et fenêtres

Dans cette étude, nous proposerons différents scénarios dans lesquelles les fenêtres et portes pourront être ouvertes ou fermées, voir même calfeutrées pour certaines portes.

Concernant les fenêtres ouvertes, les flux d'air sont modélisés à l'aide d'un modèle d'écoulement à double sens (l'air peut entrer et sortir en même temps) avec une hauteur neutre, et un coefficient de décharge de **0,78** comme proposé par Weber et Kearney [78], pour une surface d'ouverture correspondant à la taille d'une fenêtre c'est à dire **1,2 m x 1,35 m**.

Pour les fenêtres semi-ouvertes, nous utilisons la même modélisation mais avec une surface d'ouverture de **0,3 m x 1,35 m** (au lieu de 1,2 m x 1,35 m).

Pour les portes intérieures ouvertes, les flux d'air sont calculés en utilisant le même modèle de flux bidirectionnel que pour les fenêtres ouvertes, cette fois la surface d'ouverture est de 2 m x 0,8 m.

Dans d'autres scénarios, les portes intérieures sont supposées être fermées, comme cela a été observé dans la campagne menée par Bernard [79]. Dans ce cas, un détalonnage de la porte est généralement exigé par les règlements de ventilation, il est modélisé par une seule ouverture de 1 cm de haut.

Pour les portes étanches, aucun détalonnage n'est modélisé, cela équivaut donc à considérer qu'aucun flux d'air ne passe par la porte.

2.2.6 Particule support du virus : émission et transfert

De nombreuses incertitudes subsistent quant à la caractérisation des aérosols de SARS-CoV-2, à leur réactivité sur les surfaces et à la taille des particules agglomérées susceptibles de contenir le SARS-CoV-2 ; en tout état de cause, la taille de celles-ci peut varier en fonction de la situation. La particule virale a un diamètre de 80-160 nm, mais peut s'agglomérer avec d'autres particules pour atteindre des tailles allant jusqu'à 5 µm [80].

Dans notre étude, le virus sous forme d'aérosol est considéré comme un polluant, exactement de la même manière que d'autres particules en suspension dans l'air.

Des études montrent que le taux d'émission du virus dépend fortement de l'activité de la personne infectée. Des incertitudes subsistent quant aux valeurs exactes, mais Buonanno [50] propose un tableau de données à utiliser pour les calculs. Les valeurs dépendent de deux facteurs croisés : l'activité physique de l'occupant, séparée en quatre cas (au repos, debout, exercice léger, exercice intense), et dépendent également de l'activité orale de l'occupant (respiration simple, parler ou parler fort). Ces valeurs s'étendent de 2 quanta.h⁻¹ pour une personne silencieuse au repos à 408 quanta.h⁻¹ pour une personne qui parle fort en faisant un exercice intense[50].

Dans notre étude, nous supposons que l'occupant infecté et en silence au repos pendant toute la modélisation. Les hypothèses retenues sont identiques à celle de l'outil de calcul développé par REHVA, nous supposons donc que l'occupant infecté émet des particules contaminées à un taux constant, qui correspond à la valeur du 90^{ème} percentile de Buonanno [81] pour un taux au repos avec respiration simple : **3,1 quanta.h⁻¹**. Les réactions avec d'autres polluants de l'air intérieur sont ignorées, bien que l'on sache que les niveaux de ces derniers sont élevés dans les bâtiments résidentiels et qu'ils augmentent avec l'humidité et la température.

Nous introduisons également le taux de décroissance du virus, sa valeur varie entre 0 h⁻¹ et 0,63 h⁻¹ selon les sources. Dans ce modèle, comme dans l'outil de calcul développé par Rehva, on choisit la moyenne des valeurs de la littérature : **λ=0,32 h⁻¹**. [82] [52]

$$S_{cov}(t) = G_{cov} e^{-t/t_c}$$

Équation 8

Avec S_{cov} la quantité de virus, G_{cov} le taux d'émission initiale et t_c la constante de temps de décroissance, qui correspond à $1/\lambda$.

De plus, le phénomène de déposition du virus est pris en compte, il dépend du taux de déposition des particules et du volume de la pièce en question. La littérature montre que la vitesse de déposition du SARS-CoV-2 peut varier entre 0,24 h⁻¹ et 1,5 h⁻¹ selon la taille des particules, la valeur **0,3 h⁻¹** est retenue dans notre modèle [52]. Ainsi, dans chaque zone du bâtiment modélisé sur CONTAM, un élément de type « puit » représentant le phénomène de déposition est introduit. Il élimine les particules de virus en suivant l'équation suivante :

$$R_{cov}(t) = k_d V_z \rho_{air}(t) C_{cov}(t)$$

Équation 9

Où $R(t)$ est le taux d'élimination (par déposition) du contaminant covid à l'instant t [quanta/s], V_z est le volume de la zone [m³], k_d est le taux de déposition [1/s], $\rho_{air}(t)$ est la densité de l'air dans la zone source à l'instant t [kgair/m³] et $C_{cov}(t)$ est la concentration du contaminant covid à l'instant t [quanta/kgair].

Après avoir été rejetées par l'occupant infecté, ces particules contaminées dans l'air se déplacent dans les différentes pièces de la maison, en raison des différences de pression entre les zones. Elles sont transportées dans l'air par les défauts de perméabilités des cloisons extérieures et intérieures, par les détalonnages des portes si elles sont fermées, par les fenêtres si elles sont ouvertes, et par les éléments de ventilation (entrées et sorties d'air).

En ce qui concerne le passage par les défauts de perméabilités, il faut considérer le facteur de pénétration ; plus ce facteur est élevé, plus les particules peuvent pénétrer par les défauts. Un facteur de pénétration de 1 signifie que le défaut ne présente aucun obstacle au passage de la particule.

Liu et Nazaroff [83] ont mesuré les facteurs de pénétration en laboratoire, pour différentes tailles de particules (0,02-7 μm) et pour des fissures à géométrie variable (hauteur de 0,25 à 1 mm, longueur de 4 à 10 cm), sur différents matériaux (aluminium, brique, béton, bois, contreplaqué), avec une réduction de pression de 4 ou 10 Pascals. Ils ont ensuite comparé leurs mesures avec les résultats du modèle qu'ils ont développé. Ils concluent que pour des particules d'un diamètre de 0,1-1,0 μm , avec une dépression supérieure à 4 Pascals, ce facteur de pénétration est proche de 1 (pas de filtration). Ils ont également montré que sur une plaque d'aluminium, avec une dépression de 4 Pascals, le facteur de pénétration est abaissé à 0,2 pour des particules de diamètre supérieur à 1 μm traversant une fissure de hauteur 0,25 mm et de longueur 9,4 mm, ou pour des particules de diamètre supérieur à 2 μm pour une fissure de même hauteur et de longueur 4,3 cm. Si la hauteur de la fissure augmente et atteint 1 mm, alors le facteur de pénétration est beaucoup plus élevé, et est proche de 1. Les auteurs ont également souligné l'importance du dépôt de particules de taille 0,1-0,4 μm à la surface des fuites, qui diminue alors le facteur de pénétration.

La revue de littérature de Chen et Zhao [84] propose des valeurs de facteurs de pénétration par différents défauts d'étanchéité à l'air mesurés en laboratoire et dans des bâtiments réels. Les facteurs de pénétration mesurés dans des bâtiments réels vont de 0,6 à 1,0 pour des particules de 0,05 et 2 μm de diamètre. Pour les particules plus grandes, les facteurs de pénétration diminuent à mesure que les effets gravitationnels augmentent. Pour les particules plus petites, les facteurs de pénétration sont également plus faibles en raison des effets de diffusion brownienne.

Avec ces données de la littérature, et face aux nombreuses incertitudes sur la caractérisation des aérosols du SARS-CoV-2, nous supposons un facteur de pénétration de 1. En effet, dès qu'une fenêtre est ouverte, les pressions exercées sur les parois intérieures peuvent atteindre des niveaux similaires aux pressions normalement exercées sur les parois extérieures, atteignant régulièrement -2 Pa, et jusqu'à -7 à -11 Pa (vent fort) dans nos simulations.

2.3 Cas de référence et scénarios étudiés

Dans le cas de référence (scénario 0), aucune stratégie particulière n'est mise en place pour limiter la propagation aérienne du virus. Ainsi, on considère que toutes les portes intérieures de la maison sont fermées, et que les fenêtres sont toutes également fermées.

Nous étudierons différents scénarios qui visent à protéger les habitants en limitant la propagation du virus. Ces scénarios sont tous basés sur une recommandation du Haut conseil de la santé publique (HCSP) [85] : il est conseillé de calfeutrer la porte de la salle de quarantaine et d'ouvrir la fenêtre.

Ainsi, dans la maison individuelle, et dans le logement de référence du bâtiment collectif, cette recommandation sera suivie avec une ouverture des fenêtres trois fois par jour pendant quinze minutes aux horaires suivantes : à 8h00, à 12h00 et à 18h00. Dans l'étude du logement dans l'immeuble collectif, les logements voisins ont tous, quel que soit le scénario, l'ensemble des portes et des fenêtres fermées.

Pour étudier la sensibilité de nos résultats, nous avons étudié six scénarios d'atténuation, résumés dans le Tableau 11.

- Le scénario 1 correspond exactement à la stratégie recommandée par le Haut conseil de la santé publique français [74],
- Le scénario 2 correspond à une stratégie de dilution du virus avec la zone des pièces adjacentes, qui est la pièce à vivre (cuisine+salon) pour la maison individuelle et le couloir dans le bâtiment collectif. Afin d'éviter une concentration excessive dans la pièce de quarantaine qui pourrait permettre une contamination croisée avec les pièces connectées (chambre du haut, chambre du bas ou chambres adjacentes), où les autres occupants passent beaucoup de temps,
- Le scénario 3 correspond à une stratégie de dilution forte de la concentration virale, avec toutes les portes entre les pièces ouvertes. Les stratégies de dilution pourraient s'avérer plus intéressantes au regard des résultats des risques d'infection,
- Les scénarios 4 et 5 sont utilisés pour évaluer l'effet de l'ouverture simultanée de trois autres fenêtres dans le logement, afin d'équilibrer les flux d'air contaminant de la salle de quarantaine vers les autres zones. Les fenêtres sont ouvertes sur la même façade du bâtiment que la salle de quarantaine (scénario 5) ou sur la même façade et également sur la façade opposée (scénario 4),
- Le scénario 6 évalue l'effet de la semi ouverture des fenêtres de la salle de quarantaine, afin de réduire le flux d'air entrant par cette voie, qui, selon l'approche du bilan massique, est censé être transféré aux autres pièces connectées.

	Fenêtre de la chambre de quarantaine	Porte de la chambre de quarantaine	Autres portes internes	3 autres fenêtres - même façade	3 autres fenêtres - façade opposée
Cas de référence	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>
Scénario 1-Fenêtre	<i>Ouverte</i>	<i>Calfeutrée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>
Scénario 2- Fenêtre-PorteOuv	<i>Ouverte</i>	<i>Ouverte</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>
Scénario 3- Fenêtre-TtesPortes	<i>Ouverte</i>	<i>Ouverte</i>	<i>Ouverte</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>
Scénario 4-3Fenêtres	<i>Ouverte</i>	<i>Calfeutrée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Ouverte</i>	<i>Fermée</i>
Scénario 5-3Fenêtres_NonTrav	<i>Ouverte</i>	<i>Calfeutrée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>
Scénario 6- FenêtreEntrouv	<i>Semi-Ouverte</i>	<i>Calfeutrée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>	<i>Fermée</i>

Tableau 11 : Définition des scénarios

2.4 Indicateurs de performance : Exposition relative et risque d'infection

2.4.1 Exposition relative

Dans les modèles Dose-Réponse présentés ci-avant, la dose se calcule à partir de l'exposition des personnes aux divers polluants ou virus. Cet indicateur très commun utilisé dans la littérature [86] et proposé par [11], est étudié dans cette étude. Nous examinons l'exposition cumulée aux particules contaminées E_j , pour chaque occupant j (Équation 9). Nous la calculons, et nous la comparons à l'exposition du cas de référence, afin d'évaluer les performances relatives des différentes stratégies.

$$E_j = \sum_i C_j(t_i) * \Delta t_i$$

Équation 10

où $C_j(t_i)$ est la concentration d'exposition pour l'occupant j au pas de temps $\Delta t_i = 10$ minutes.

Comme la dose infectante nécessaire pour que le SARS-CoV-2 se transmette est encore incertaine, comme pour les autres virus, nous choisissons d'analyser dans un premier temps nos résultats en effectuant une comparaison relative, et non pour leurs valeurs absolues.

Cette exposition cumulée est calculée en tenant compte des horaires d'occupation indiqués dans le Tableau 3 et le Tableau 4, sur la période simulée de 2 semaines (360 h). Pour ce faire, nous analysons les données de sortie de CONTAM, qui fournissent les concentrations dans chacune des zones pour chacun des 2160 pas de temps. Ces données sont exploitées à l'aide d'un code réalisé sur le logiciel Python, qui permet d'obtenir le tableau contenant les expositions cumulées de tous les habitants.

2.4.2 Risque d'infection

De nombreuses études portant sur la propagation du virus en fonction de la ventilation utilisent l'équation de Wells Riley pour calculer la probabilité d'infection.

La plupart de ces études sont des modèles monozones qui s'intéressent uniquement à la pièce dans laquelle la personne infectée se situe, puisque l'équation simplifiée ne prend en compte qu'une concentration et un débit de ventilation. Pour étudier les phénomènes à l'échelle d'un bâtiment, il est nécessaire d'adapter l'équation pour une analyse multizone. L'étude de Pease [51] propose une méthode que nous utiliserons. La probabilité d'infection P , est calculée, sur la base d'une loi de Poisson, de la manière suivante:

$$P = 1 - e^{-\mu}$$

Équation 1

où μ est le nombre moyen de quanta respirés par une personne susceptible d'être infectée, c'est-à-dire une personne qui est exposée au virus. Pour obtenir le nombre moyen de quanta respirés à partir de la concentration de quanta, on utilise la méthode de Rudnich et Milton [87], [88]:

$$\mu = p \int_{t_1}^{t_2} C_i dt$$

Équation 11

où C_i est les concentrations en quanta par volume, p est le débit respiratoire volumétrique, et t_1 et t_2 sont les heures de début et de fin d'exposition (où $t_2 > t_1 \geq 0$).

Avec les résultats de la simulation CONTAM, on peut recueillir pour chaque occupant les valeurs des concentrations de particules dans la pièce où il se trouve pour chaque pas de temps. Les concentrations pour chaque occupant sont additionnées sur une journée, puis multipliées par le taux de respiration volumétrique $p = 0,48 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, pour obtenir la valeur du nombre moyen de quanta respirés, puis la probabilité d'infection P en est déduite.

Ensuite, l'écriture d'un programme python permet d'exploiter les résultats avec la méthode de calcul décrite ci-dessus, et de générer le tableau regroupant les résultats des risques d'infection pour chaque habitant dans chaque cas d'étude.

2.4.3 Débits interzones

Ensuite pour expliquer nos résultats et comprendre l'impact des flux d'air contaminés dans chacun des cas, il faudra étudier les débits d'air.

Un programme nommé Simread permet de créer, à partir des résultats de la simulation CONTAM, un fichier de type .lfr, il s'agit d'un fichier sous forme de tableau qui fournit la valeur du débit d'air au niveau de chaque nœud interzone pour chaque pas de temps de la simulation. On appelle « nœud » un point de passage d'un flux d'air, c'est-à-dire dans le modèle : une bouche d'extraction d'air, une bouche d'insufflation d'air, une entrée d'air et ou un défaut de perméabilité de paroi représenté par un point de fuite d'air au milieu de la paroi.

Un programme python développé pour cette étude effectuera la somme des débits d'air sur toute la période de la simulation pour chaque nœud interzone, et la création d'un tableau récapitulatif des résultats. Ce sont ces débits d'air cumulée sur toute la période de la simulation qui sont ensuite analysés pour comprendre les flux d'air dans chaque scénario.

Nous étudierons uniquement les débits d'air passant par la chambre confinée (BR1).

Dans le cas de la maison individuelle, ce sont les débits d'air passant à travers :

- Les défauts de perméabilité des parois des murs extérieurs : Ext_nord et Ext_Est,
- Les défauts de perméabilité des parois des murs intérieurs en contact avec la pièce de vie et l'entrée : respectivement LR+K et Hall,
- Les défauts de perméabilité des parois du plafond en contact avec la chambre à l'étage : BR2,
- La porte de la chambre donnant vers l'entrée : door,
- La fenêtre de la chambre, sur le mur Nord : window,
- Les entrées d'air dans le cas des systèmes de ventilation simple-flux : EA.

Dans le cas du bâtiment collectif, il s'agit des débits suivants :

- Les défauts de perméabilité des parois du mur extérieur : Ext
- Les défauts de perméabilité des parois des murs intérieurs en contact avec la chambre voisine, le couloir, la salle de bain : BR2, corr, Bath1
- Les défauts de perméabilité des murs inter-logement en contact avec la cuisine du logement voisin : K_E
- Les défauts de perméabilité des parois horizontales du plancher et du plafond : floor, ceiling
- La porte de la chambre donnant vers le couloir : door,
- La fenêtre de la chambre, sur le mur extérieur Nord: window,
- Les entrées d'air dans le cas des systèmes de ventilation simple-flux : EA.

Tous les débits sont comptés positifs lorsqu'ils rentrent dans la pièce et négatifs lorsqu'ils en sortent.

3. Résultats

3.1 La maison individuelle

Les Figure 7, Figure 10 et Figure 13 montrent les résultats de expositions relatives des cinq occupants par rapport au cas de référence. Les Figure 8, Figure 11 et Figure 14 proposent, elles, les résultats par rapport à l'indicateur du risque d'infection, elles ne concernent donc pas l'occupant déjà infecté en quarantaine (Occupant n°5). Enfin, les Figure 9, Figure 12 et Figure 14 présentent les valeurs des débits cumulés entrant ou sortant de la chambre de quarantaine.

3.1.1 Ventilation double flux

Exposition relative

Avec ce type de système de ventilation, les différences de pression entre les pièces sont donc très faibles, ce qui entraîne en théorie des débits d'air plus faibles entre les pièces. Nous observons que l'ouverture de la fenêtre dans la pièce de quarantaine entraîne presque dans tous les scénarios une réduction de l'exposition de tous les occupants. Seul le scénario 3 où toutes les portes de la maison sont ouvertes entraîne une augmentation de l'exposition pour la plupart des occupants. Le scénario de semi-ouverture de la fenêtre augmente l'exposition d'un seul occupant (Occ.3).

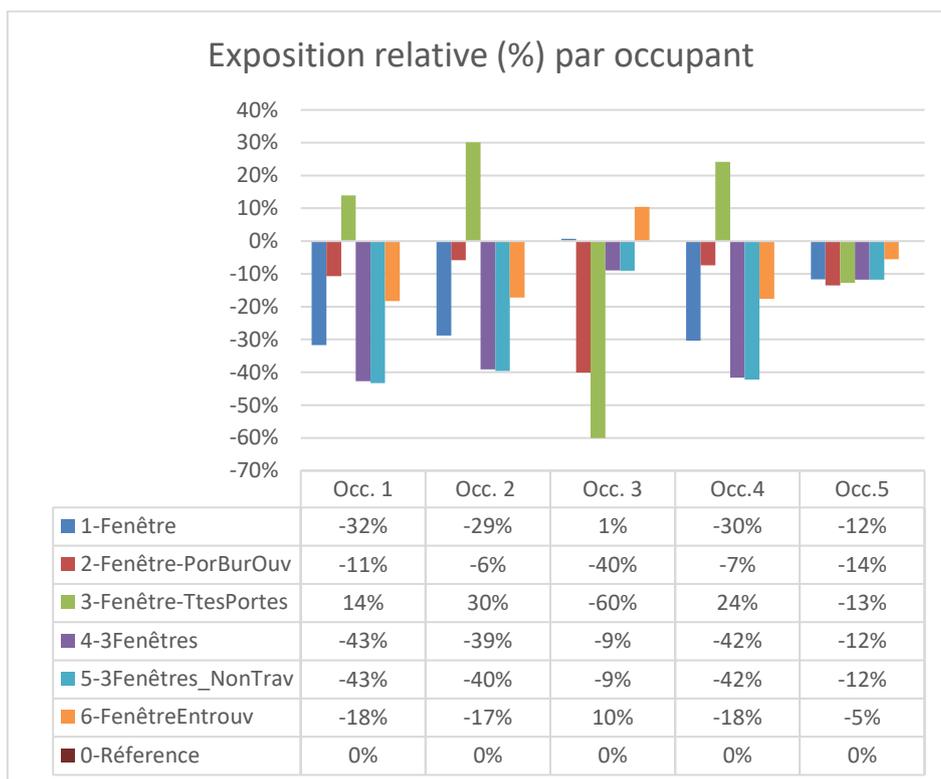


Figure 7 : Résultats d'exposition relative des occupants de la maison individuelle en système double-flux auto-réglable

Plus précisément, on peut noter que :

- L'exposition de l'occupant en quarantaine (Occ. 5) est réduite entre -5% et -14% pour tous les scénarios. L'influence de l'ouverture de plusieurs fenêtres ou de l'ouverture des portes n'est pas remarquable sur cet occupant, puisque la diminution est toujours comprise entre -12% et -14% sur les cinq premiers scénarios. Cependant, une ouverture de la fenêtre à moitié entraîne une baisse de l'exposition plus faible, -5%.

- Les scénarios 1 et 6, d'ouverture et de semi ouverture d'une seule fenêtre, entraînent une légère augmentation de l'exposition (respectivement +1% et +6%) pour l'occupant 3 qui vit au-dessus de la chambre confinée. En effet, le calfeutrage de la chambre confinée entraîne une augmentation des débits interzones par les défauts de perméabilité. Alors, même si la fenêtre de la chambre confinée est ouverte trois fois par jour, cela ne suffit pas pour compenser le calfeutrage de la porte.
- Les seules nettes augmentations d'expositions observées concernent la stratégie de forte dilution où toutes les portes internes sont ouvertes (scénario 3), alors les expositions de trois occupants augmentent considérablement : de 14% (Occ. 1), 30% (Occ. 2) et de 24% (Occ. 4),
- Ces trois occupants voient leurs expositions baisser avec la stratégie de faible dilution (scénario 2) où la porte de la chambre confinée est ouverte. Elle présente des baisses de l'exposition pour deux occupants : -11% (Occ. 1), -6% (Occ. 2) et -7% (Occ. 4). Ces baisses sont plus marquées dans les autres scénarios (scénarios 1, 4 et 5) avec des valeurs allant de -29% à -43%.
- L'ouverture partielle de la fenêtre (scénario 6) réduit l'efficacité de l'ouverture des fenêtres pour tous les occupants.
- Les stratégies les plus efficaces, réduisant l'exposition de plus de -12% à -43% pour tous les occupants, sont les stratégies basées sur l'ouverture simultanée des trois fenêtres dans les autres pièces (Scénarios 4&5).
- La stratégie de faible dilution du scénario 2 (ouverture de la porte de la chambre de quarantaine) semble bénéfique en terme de protection spécifique d'un seul occupant vulnérable du logement (par exemple une femme enceinte, une personne âgée). Dans ce cas, la personne concernée devrait se voir attribuer la chambre 2 (celle de l'occupant 3) et son exposition serait diminuée de -60%. Le scénario 3 offrirait une bien meilleure protection à l'occupant 3, mais ce faisant, il augmenterait l'exposition de deux autres occupants.

Risque d'infection

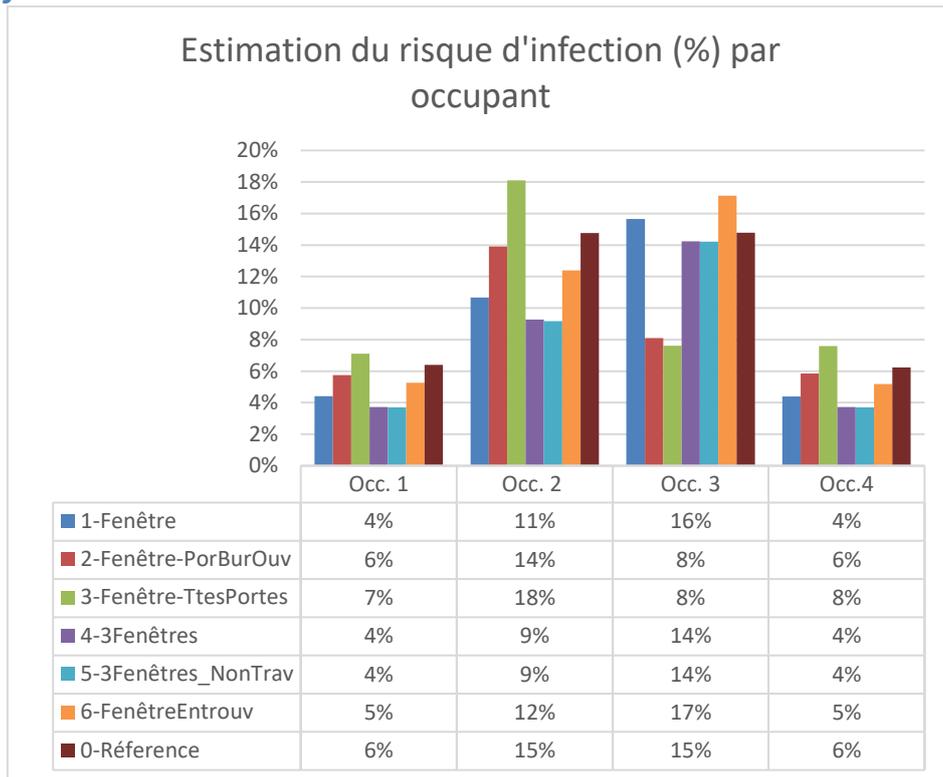


Figure 8: Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants de la maison individuelle en système double-flux auto-réglable

Pour chaque occupant, on compare maintenant les résultats des risques d'infection des différents scénarii par rapport aux résultats du cas de référence. Ainsi, on observe les mêmes tendances, ouvrir la fenêtre entraîne presque toujours une diminution du risque d'infection.

Plus précisément, on note que :

- Les occupants les plus susceptibles d'être infectés dans le scénario de référence sont les occupant 2 et 3 (15%).
- L'occupant 3 est celui qui vit dans la chambre au-dessus de la chambre du contaminé. Pour cet occupant, les stratégies de dilution (2 et 3) sont les plus efficaces, son risque d'infection passerait à seulement 8%. Pour la stratégie de faible dilution, l'impact sur les autres occupants n'est pas remarquable. Cependant, on voit que dans la stratégie de forte dilution, les risques des autres occupants augmentent, en particulier l'occupant 2 qui passe sa journée dans la salle de vie adjacente à la chambre confinée, son risque d'infection passe de 15% à 18%. Pour adopter cette stratégie il faudrait limiter le temps passé par les occupants au rez-de-chaussée. En effet, si l'occupant 2 passe sa journée dans la chambre (BR4) où il dort, au 1er étage, alors il aura le même planning que l'occupant 1 et les mêmes risques d'infection. Les stratégies de dilution permettront à tous les occupants d'obtenir des risques d'infection inférieurs à 8%.
- Hormis la stratégie de semi ouverture de la fenêtre, les autres stratégies d'ouverture de fenêtres sont efficaces pour tous les habitants, en particulier celles où quatre fenêtres sont ouvertes (scénarios 4 et 5). Dans ces derniers scénarios, chaque occupant voit son risque d'infection baisser.

Débits interzones

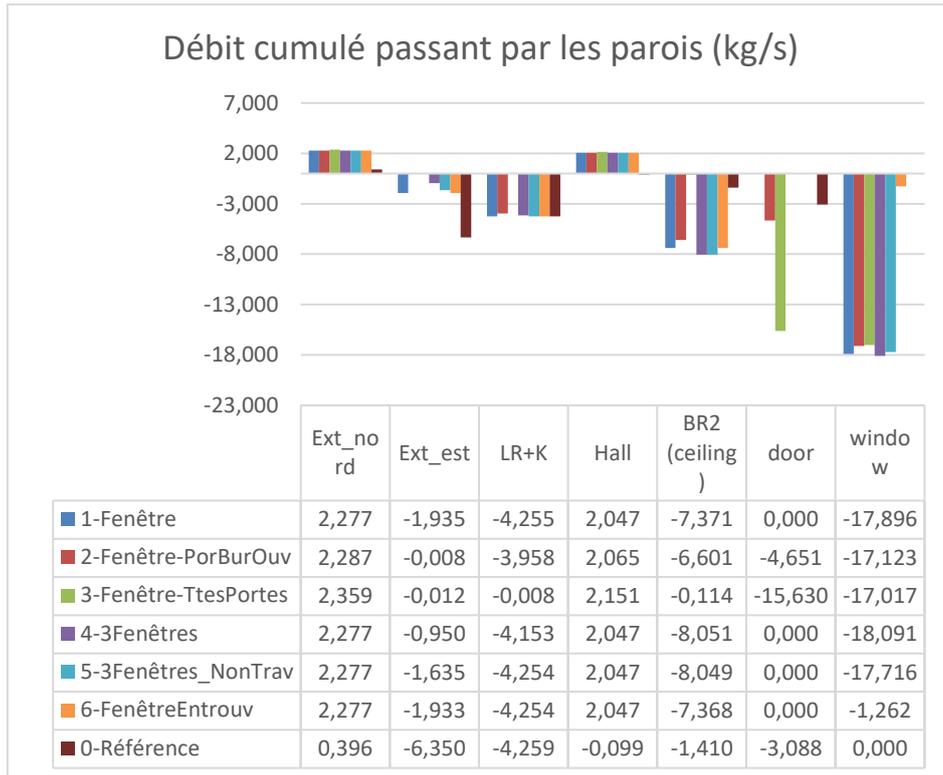


Figure 9 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confiné dans la maison individuelle en système double-flux

Dans le scénario de référence, la fenêtre est fermée, l'air entre principalement par la bouche d'insufflation située dans la chambre, il y a également une légère entrée d'air par le mur extérieur nord avec 0,4 kg/s cumulée sur toute la période de simulation. Les autres débits sont sortants, du plus important au plus faible on retrouve : le mur extérieur est, le mur de la pièce à vivre, la porte donnant sur l'entrée, le plafond, et le mur de l'entrée. Ainsi, les débits d'air vers les autres pièces de la maison sont toujours sortants dans le cas de référence, ceci est favorable à la transmission du virus.

La répartition des débits d'air dans les autres stratégies donnent les résultats suivants :

- Les résultats de la plupart des autres stratégies sont très similaires, à l'exception des stratégies de dilution. L'ouverture de la fenêtre engendre un débit d'air sortant important vers l'extérieur, la porte est calfeutrée. Les débits d'air sortant par les fuites au plafonds sont fortement en hausse par rapport au scénario de référence, et les débits d'air sortant vers l'extérieur sont en baisse. Ainsi, le virus pourra potentiellement plus se propager à l'étage du dessus où vivent les autres occupant du logement. Les débits d'air vers la salle de vie n'ont pas changé, ils restent sortants avec des valeurs similaires. On observe néanmoins un changement de direction des débits d'air à travers le mur vers le hall d'entrée, les débits sont positifs, donc l'air, et les particules infectieuses, ne sortent plus autant de la pièce par cette paroi.
- Pour les stratégies de dilution, et particulièrement la stratégie de forte dilution, les résultats sont différents. Il y a toujours presque autant d'air qui sort de la pièce par la fenêtre vers l'extérieur. Cependant, beaucoup plus d'air sort par la porte donnant sur l'entrée, et reste donc dans la maison. En contrepartie, les débits d'air sortant vers l'étage du dessus et vers la pièce de vie sont beaucoup plus faibles. Les occupants vivants principalement dans ces dernières pièces, les bons résultats d'exposition de l'habitant vivant dans la chambre du

dessus (occupant 3) s'expliquent. Cependant, les résultats moins bons pour l'occupant qui passe sa journée au rez-de-chaussée (occupant 2) sont dus aux débits d'air plus importants qui sortent de la chambre à travers la porte.

3.1.2 Simple flux

Exposition relative

Ce type de système de ventilation extrait les flux d'air des pièces à forte humidité, en créant une différence de pression par rapport au salon et aux chambres. Dans ces zones, l'air frais entre par des entrées d'air placées dans le mur ou sur les fenêtres, grâce aux différences de pression créées, ainsi que les effets de vent et le tirage thermique (effet de cheminée).

Avec ce type de système de ventilation, par opposition à un système double-flux, il existe des différences de pression entre les pièces, ce qui entraîne un flux d'air de pièce en pièce. Dans ce cas, nous observons que l'ouverture de la fenêtre dans la salle de quarantaine entraîne toujours une augmentation de l'exposition pour au moins un autre occupant.

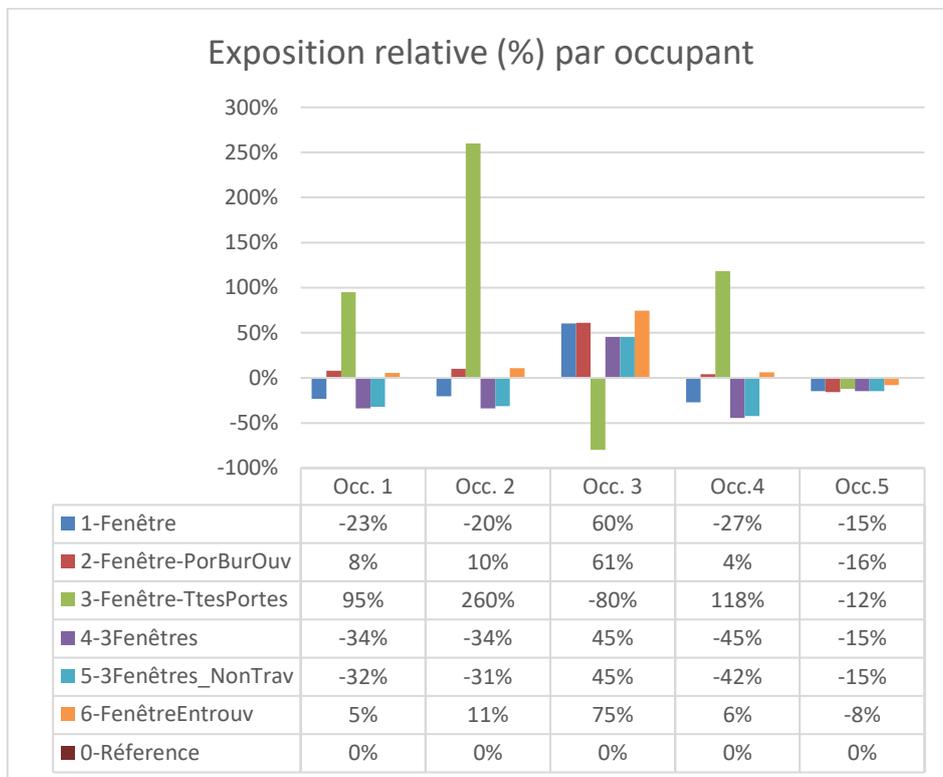


Figure 10 : Résultats d'exposition relative des occupants de la maison individuelle en système simple-flux auto-réglable

Plus précisément, on peut noter que :

- L'exposition de l'occupant en quarantaine est réduite entre -8 et -16%, sans qu'il y ait, là encore, d'influence de l'équilibrage des pressions par l'ouverture de trois autres fenêtres (exposition réduite de -15% dans les scénarios 1,4&5), mais une influence notable de la seule demi-ouverture de la fenêtre (l'exposition est inférieure de -8% dans le scénario 6),
- Dans tous les scénarios, l'exposition d'au moins un des autres occupants augmente considérablement : de +45% (scénarios 4 et 5), de +60% (scénarios 1 et 2), de +75% (scénario 6) et jusque +260% (scénario 3). En conséquence, nous pouvons dire qu'aucun des scénarios étudiés n'est plus protecteur que le scénario de référence. En d'autres termes, il est

préférable de ne pas ouvrir la fenêtre de la salle de quarantaine pour limiter la transmission du virus.

- Dans tous les scénarios, à l'exception des scénarios 2 et 6, l'exposition d'au moins un autre occupant est réduite en même temps : les diminutions vont de -20% (scénario 1) à -80% (scénario 3).
- L'occupant dont l'exposition augmente le plus suite à l'ouverture de la fenêtre de la salle de quarantaine est l'occupant 3, cet occupant vit dans la chambre 2 juste au-dessus de la salle de quarantaine. L'exception à cette règle est le scénario 3, où l'ouverture de toutes les portes modifie complètement la direction des flux d'air dans la maison.

Risque d'infection

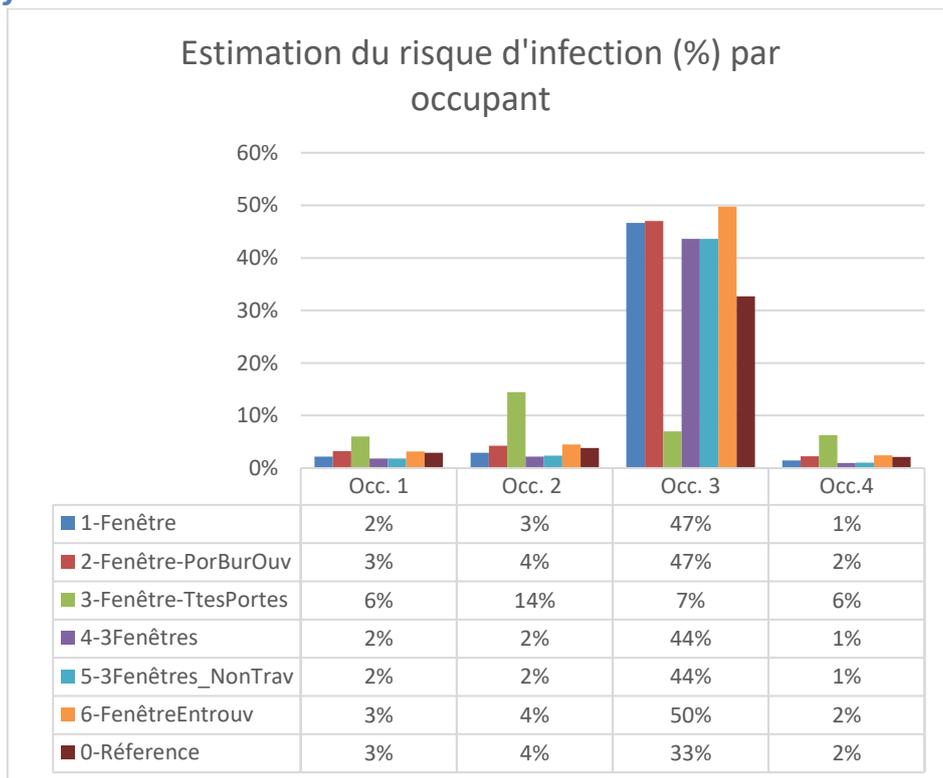


Figure 11: Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants de la maison individuelle en système simple-flux auto-réglable

On peut maintenant analyser les résultats du deuxième indicateur afin de repérer les occupants les plus à risque :

- Dans le cas de référence, c'est l'occupant 3, celui qui vit dans la chambre au-dessus de la zone d'émission du virus, qui a le plus grand risque d'être infecté, avec une probabilité d'infection de 33%. Mise à part la stratégie de forte dilution (scénario 3), toutes les autres stratégies augmentent le risque d'infection de cet occupant, son risque d'infection atteint 44 à 50%. Il est important de diminuer son risque d'infection qui est déjà haut dans le cas de référence. La stratégie 3 permet de largement baisser le risque d'infection de cet occupant puisqu'il n'atteindrait plus que 7%, cependant les autres occupants voient leur risque augmenter...
- En effet, dans le scénario de référence, les risques d'infection des autres occupants (occ. 1, 2 et 4) sont compris entre 2 et 4%. Tous les scénarios (1, 2, 4, 5 et 6), sauf le scénario de forte dilution (3), conservent pour ces occupants des risques d'infection compris entre 2 et 4%. Le scénario 3 quant à lui engendre des résultats avec une différence plus marquée, les risques

atteignent 6%, 7% et même jusqu'à 14% pour l'occupant 2, qui passe la journée au rez-de-chaussée.

- Ainsi, pour que le risque d'infection de chaque occupant descende sous 14% la stratégie de forte dilution est la plus adaptée. De plus, si tous les occupants limitent leur temps passé au même étage que l'infecté, c'est-à-dire si l'occupant 2 passe sa journée dans une chambre du haut alors, la stratégie de forte dilution permettra à tous les occupants d'avoir un risque d'infection inférieur à 7%.

Débit interzone

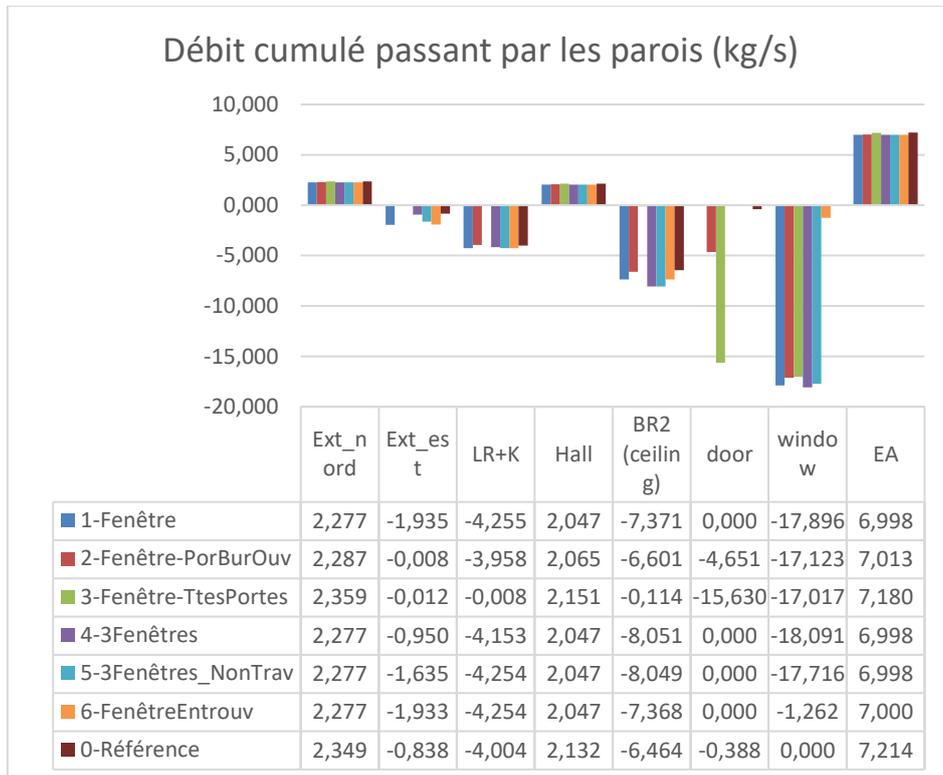


Figure 12 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confinée dans la maison individuelle en système simple-flux

Dans le cas de référence, la fenêtre est fermée, l'air extérieur entre principalement par les entrées d'air, et par le mur extérieur nord. Concernant les parois internes à la maison, l'air a plutôt tendance à sortir de la chambre confinée, en particulier vers le plafond, avec des valeurs importantes de débit cumulé total sur la période de la simulation de 6,5kg/s. Ainsi, ceci est une cause probable de la surexposition de l'occupant 3, de la chambre au-dessus (BR2). Les débits d'air sortant vers la pièce à vivre sont également importants.

En comparant les débits d'air des autres stratégies avec ceux du cas de référence, on peut noter :

- Les valeurs des débits d'air extérieur entrant dans la chambre par les entrées d'air et le mur nord ont des valeurs équivalentes quels que soient les scénarios.
- Les débits d'air sortant vers l'extérieur par la fenêtre sont également proches dans les différentes stratégies, mis à part dans le cas de la semi-ouverte de la fenêtre, où ce débit est largement plus faible. Ceci est cohérent avec le fait que cette dernière stratégie a les moins bons résultats de risque d'infection.
- Dans la stratégie de forte dilution, très peu d'air sort directement de la chambre confinée vers la pièce à vivre ou la chambre de l'étage. Cependant, un débit important d'air sort par la porte vers le hall d'entrée. Ainsi, les mouvements d'air sont différents de ceux des autres scénarios, et engendrent des résultats d'exposition également différents.

3.1.3 Simple flux hygroréglable

Exposition relative

Tout comme le système de ventilation simple flux auto-réglable, ce type de système de ventilation extrait les flux d'air des pièces à forte humidité, créant une différence de pression par rapport au salon et aux chambres, mais ici, les débits d'air extrait ne sont pas constants, ils dépendent du taux d'humidité de la pièce, donc indirectement de la localisation des habitants.

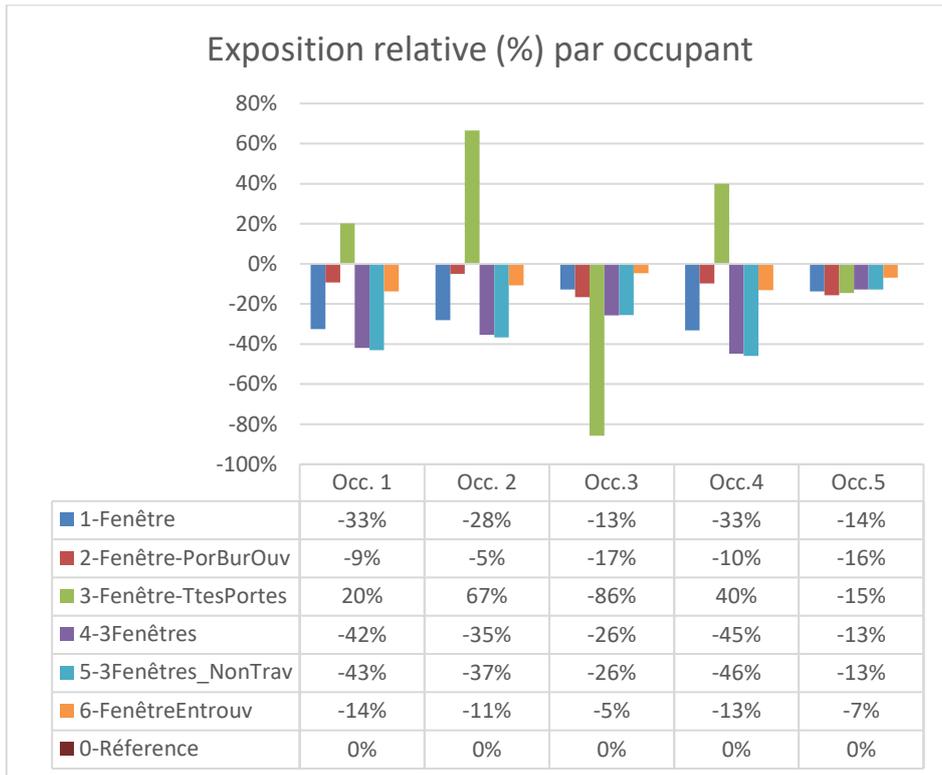


Figure 13: Résultats d'exposition relative des occupants de la maison individuelle en système simple-flux hygroréglable

Ainsi, on observe que l'ouverture de la fenêtre dans la pièce de quarantaine entraîne presque dans tous les scénarios une réduction de l'exposition de tous les occupants. Seuls le scénario où toutes les portes de la maison sont ouvertes échappe à cette règle, il entraîne une augmentation de l'exposition pour la plupart des occupants.

Plus précisément, on peut noter que :

- L'exposition de l'occupant en quarantaine est réduite entre -7% et -14% pour tous les scénarios. L'influence de l'ouverture de plusieurs fenêtres ou de l'ouverture des portes n'est pas non plus remarquable sur cet occupant, la diminution vaut entre -13 et -16% sur les 5 premiers scénarios. Cependant, une ouverture de la fenêtre à moitié entraîne une baisse de l'exposition plus faible, 7%.
- Les augmentations d'expositions observés proviennent toute de la stratégie de forte dilution (scénario 3), avec une forte hausse pour les expositions de trois occupants: de 20% (Occ. 1), 67% (Occ. 2) et de 40% (Occ. 4),
- Dans tous les autres scénarios, les expositions des autres occupants sont réduites dans des proportions allant de -5% (Occ. 3 dans le scénario 6) à -86% (Occ. 3 dans le scénario 3),

- L'ouverture partielle de la fenêtre (scénario 6) réduit l'efficacité de l'ouverture des fenêtres pour tous les occupants avec des diminutions allant de -5% à -14%, alors qu'elles valent de -13 à -33% dans le scénario d'ouverture totale d'une fenêtre (scénario 1)
- Les stratégies les plus efficaces, réduisant l'exposition de plus de -13% à -46% pour tous les occupants, sont les stratégies basées sur l'ouverture simultanée des trois fenêtres dans les autres pièces (Scénarios 4&5), vient ensuite la stratégie d'ouverture de la fenêtre de la chambre en quarantaine (scénarios 1).
- De même que pour le système de ventilation double-flux, la stratégie de faible dilution du scénario 2 (ouverture de la porte de la chambre de quarantaine) semble bénéfique en terme de protection spécifique d'un seul habitant vulnérable du logement (par exemple une femme enceinte, une personne âgée) qui prendrait la place de l'occupant 3.

Risque d'infection

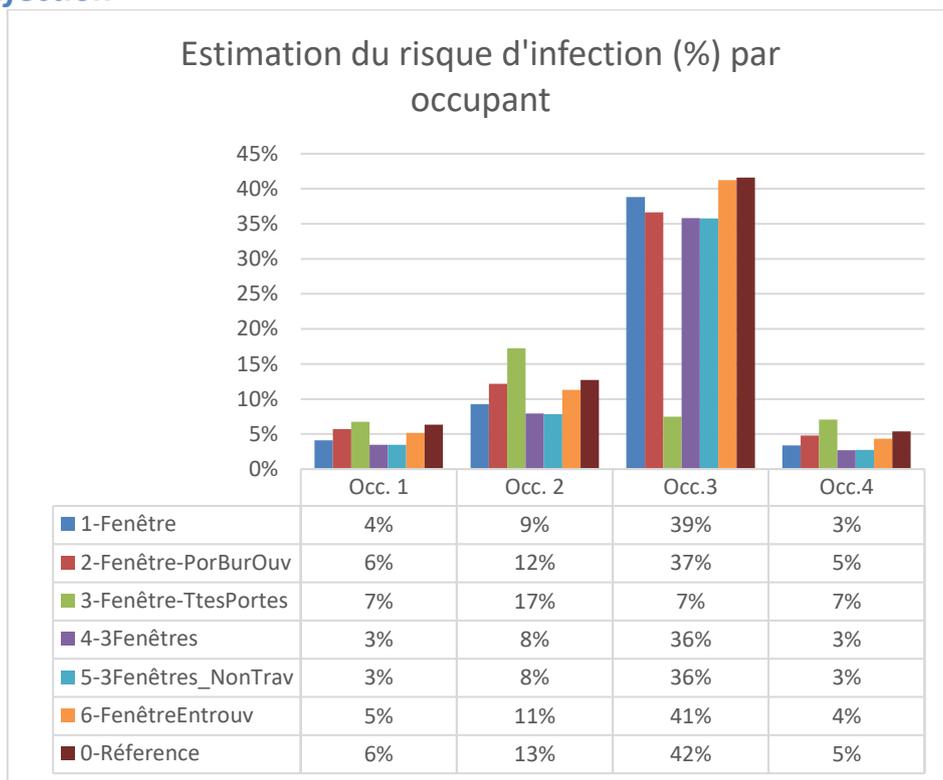


Figure 14: Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants de la maison individuelle en système simple-flux hygroréglable

En analysant maintenant les résultats des risques d'exposition, on remarque que les tendances sont très proches de ceux du système de ventilation auto-réglable. En effet, un occupant est beaucoup plus exposé à un risque de contamination dans le cas de référence et la plupart des autres cas.

- En effet, l'occupant 3 a 42% de probabilité d'être infecté dans le cas de base, la plupart des autres stratégies abaissent cette valeur seulement de 36 à 41%. Seul le scénario de forte dilution a un impact très significatif, il abaisse la probabilité d'infection à 8%.
- Ici, l'occupant 2 a un risque d'infection de 13% dans le cas de référence. Le scénario où la fenêtre est entrouverte (scénario 6) et le scénario avec la fenêtre et la chambre confinée ouverte (scénario 2) engendrent des résultats similaires au cas de référence. Les scénarios où seulement une ou plusieurs fenêtres sont ouvertes (1, 3 et 4) abaissent cette valeur jusqu'à 8 ou 9%. Cependant, dans le scénario 3, l'occupant 2 est davantage exposé au risque d'infection à hauteur de 17%.

- Les tendances pour les occupants 1 et 4 sont similaires à celles pour l'occupant 2 mais avec des valeurs ne dépassant jamais 7%.
- Ainsi, on préconise plutôt le scénario 3, qui permettrait à chacun de descendre sous 17% de probabilité d'infection, alors que dans le scénario de référence un occupant était exposé à 42% de risque d'infection.

Débits interzones

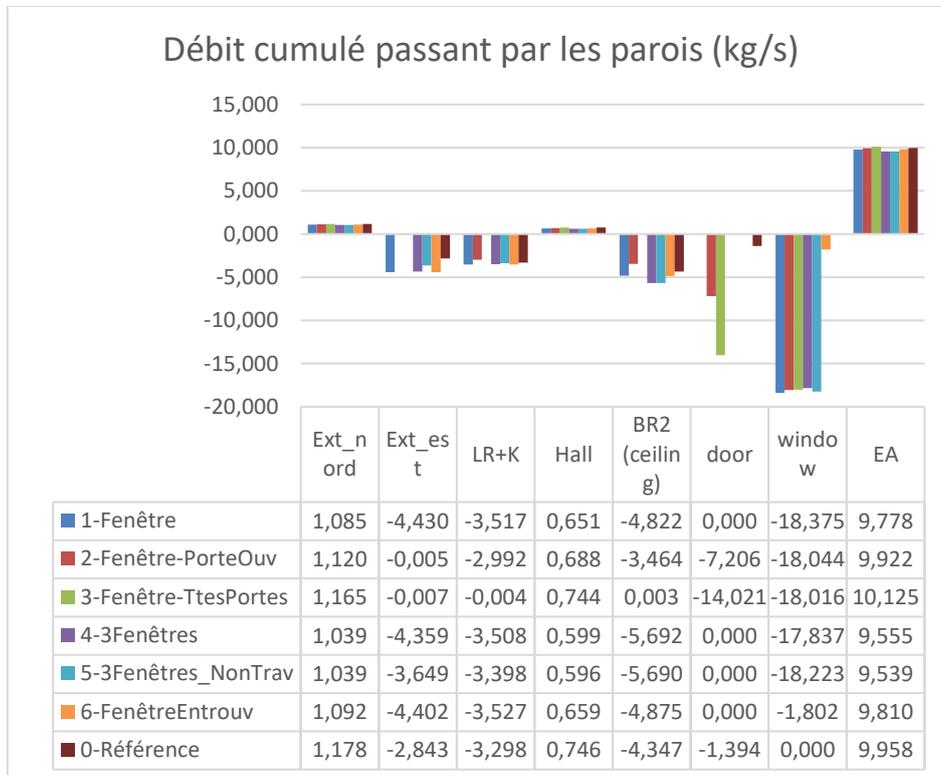


Figure 15 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confiné dans la maison individuelle en système simple-flux hygroréglable

Les résultats des débits suivent les mêmes tendances que ceux du système de ventilation simple flux auto-réglable. Dans le cas de référence, la fenêtre est fermée, l'air entre dans la pièce par les entrées d'air avec des débits plus forts que ceux du système auto-réglable, mais les débits sortants vers l'extérieur par la façade sont également plus forts. Les débits d'air sortant vers l'étage sont les plus importants, l'occupant 3 (de la chambre BR2) est donc logiquement l'habitant le plus exposé.

- Les valeurs des débits d'air extérieur entrant dans la chambre par les entrées d'air et le mur nord sont proches pour tous les scénarios. Les débits d'air sortant par la fenêtre sont également tous proches sauf pour le cas de la fenêtre entrouverte, où ce débit est bien plus faible. Ceci est cohérent avec le fait que cette dernière stratégie obtienne les moins bons résultats.
- Mises à part les stratégies de dilution, les résultats suivent les mêmes tendances pour chaque point étudié (dans les scénarios 1, 2, 3 et 4. Les débits d'air qui sont les plus sensibles aux changements de scénarios sont ceux du plafond (vers l'étage), et de la porte dans les cas où elle n'est pas fermée.
- La répartition des débits d'air dans la stratégie de forte dilution est différente du scénario de référence et des autres scénarios en général. L'air sort majoritairement de la pièce par la porte vers le couloir, il sort très peu ou entre par les autres parois de la chambre (vers l'étage, la pièce à vivre et même l'extérieur du logement). Ainsi, le virus se disperse moins à l'étage, les occupants sont moins exposés et sont soumis à des risques d'infection moins importants.

L'occupant qui passe sa journée au même étage que le malade est lui plus à risque car le virus se propage au rez-de-chaussée par les portes.

3.1.4 Bilan

Au vu de l'indicateur de l'exposition relative, la mise en place de presque toutes les stratégies testées permet de diminuer l'exposition de la totalité des occupants avec le système de ventilation double-flux et le système simple flux hygroréglable, le scénario de forte dilution semble tout de même à éviter car il augmente l'exposition de la plupart des occupants. En cas de choix du scénario de semi-ouverture de la fenêtre, il faudrait éviter de placer un occupant à risque dans la chambre 2 située au-dessus de la chambre du confiné. Cependant, avec un système de ventilation simple flux auto-réglable, quelle que soit la stratégie mise en place, au moins un habitant voit son exposition augmenter par rapport au cas de référence. A priori, on ne peut pas dire qu'une de ces stratégies est préférable au cas de référence. Alors, l'analyse des résultats du deuxième indicateur, l'estimation du risque d'infection, permet de déterminer les occupants les plus en danger et donc d'avoir plus d'éléments pour choisir ou écarter certaines stratégies.

Dans le cas du système de ventilation double-flux, dans la plupart des scénarios y compris le scénario de référence, deux occupants paraissent plus à risque que les autres. Il s'agit de l'occupant qui vit dans la chambre au-dessus de la chambre confinée, et l'occupant qui passe sa journée dans la salle de vie, adjacente à la chambre confinée. Ainsi, les résultats confortent les conclusions réalisées suite à l'étude des expositions relatives : la plupart des scénarios sont efficaces. De plus, le scénario de forte dilution est à proscrire car il augmente le risque d'infection d'un des occupants les plus exposés. On remarque aussi que le scénario de semi-ouverture des fenêtres n'est pas intéressant à mettre en place car l'occupant qui voit son risque augmenter fait partie des plus exposés.

Pour les systèmes de ventilation simple flux, les résultats des risques d'infection apportent un nouveau point de vue qui peut remettre en cause les conclusions établies à l'aide seulement des expositions relatives. En effet, le risque d'infection, pour le scénario de référence et la plupart des autres scénarios, est beaucoup plus élevé pour l'occupant 3 que pour les autres occupants. Il s'agit de l'occupant qui passe la journée au même étage que la chambre où sont émises les particules de virus. La stratégie de forte dilution a ici un intérêt car elle permet à cet occupant de voir son risque d'infection baisser considérablement, même si elle augmente les risques d'infection des autres occupants, ils restent très en dessous du risque de l'occupant 3 dans le scénario de référence. Aussi, en modifiant les plannings d'occupation des pièces on pourrait proposer à chaque habitant d'éviter au maximum de se retrouver au même étage que l'occupant infecté.

Les débits d'air permettent d'expliquer certaines observations faites à partir des deux indicateurs.

3.2 Le bâtiment collectif

Parmi tous les occupants des quatre appartements modélisés, certains ont des taux d'exposition au virus quasiment nuls quel que soit le scénario simulé, alors nous présentons dans ce rapport seulement ceux dont le résultat du risque d'infection aux particules atteint plus de 0,13% pour au moins un occupant dans un scénario.

En effet, les figures tracées montrent les résultats pour sept occupants du bâtiment. Il s'agit des quatre occupants du logement de référence (occ 8,9,10,11), des occupants des logements voisins qui vivent dans les chambres au-dessus (occ. 4) et en dessous (occ. 18) de la chambre où se situe la personne infectée, ainsi que l'occupant (occ. 6) du logement voisin à l'est (app. E) qui passe sa journée dans la cuisine adjacente à la chambre en quarantaine.

3.2.1 Ventilation double flux

Exposition relative

On observe dans chaque scénario des augmentations d'expositions relatives pour plusieurs occupants. Certains scénarios provoquent même des augmentations relatives extrêmement hautes. En effet, on peut séparer les scénarios en deux groupes, les scénarios où la porte de la chambre confinée est calfeutrée et les autres scénarios où cette porte est ouverte. Le premier groupe présente des augmentations d'expositions relatives extrêmes par rapport au cas de base alors qu'elles sont modérées pour le second groupe.

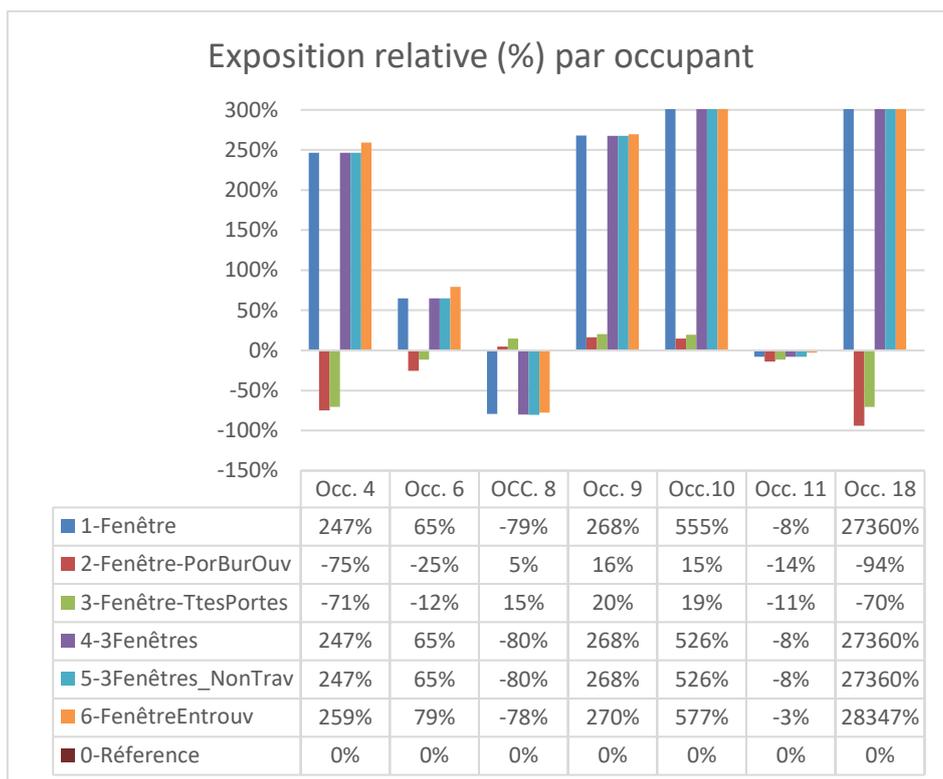


Figure 16 : Résultats d'exposition relative des occupants du bâtiment collectif en système double-flux auto-réglable

Plus précisément, on peut noter que :

- L'exposition de l'occupant confiné (occ. 11) diminue pour chaque scénario. Cette diminution vaut de -8% à -14% pour les scénarios où la fenêtre est complètement ouverte. Elle diminue à hauteur de -3% dans le cas de la fenêtre semi-ouverte (scénario 6).

- Les valeurs extrêmes des augmentations observées dans le cas de la porte calfeutrée concernent surtout les occupants de la chambre voisine du même appartement (occ. 9 et occ. 10), de la chambre du dessus (occ. 4) et de la chambre du dessous (occ. 18). Ces valeurs extrêmes sont comprises de 247% à jusque 28347% pour l'occupant 18. Ces fortes variations relatives reflètent des valeurs absolues très basses dans le cas de base, qui deviennent plus significatives dans certains scénarios. Ainsi, des occupants qui n'étaient quasiment pas exposés au virus se retrouvent parmi les occupants à surveiller.
- Les scénarios de dilution avec ouvertures des portes engendrent des augmentations d'expositions moins importantes, elles sont comprises entre 5% et 16% pour la stratégie de dilution légère (scénario 2) et de 15 à 20% pour la forte dilution (scénarios 3). Pour ces stratégies, les occupants qui voient leur exposition augmenter sont uniquement les habitants du même logement que l'occupant infecté. Les occupants des logements voisins observent tous des diminutions de leur exposition de -12% (occ. 6 scénario 3) jusqu'à -94% (occ. 18, scénario 2). Ainsi, pour protéger les logements voisins, la stratégie de dilution semble bien adaptée même si elle agit au détriment des occupants du logement de référence.
- De plus, ces résultats montrent que le fait d'ouvrir une ou plusieurs fenêtres n'a pas d'impact sur les expositions des occupants. En effet, les scénarios 1, 4 et 5 engendrent des résultats équivalents. Seul le scénario de semi-ouverture des fenêtres donne des augmentations d'exposition légèrement supérieures. Ceci montre que, plus que l'ouverture de la fenêtre, c'est le fait de calfeutrer la porte qui a un impact négatif fort sur les expositions des occupants.

Risque d'infection

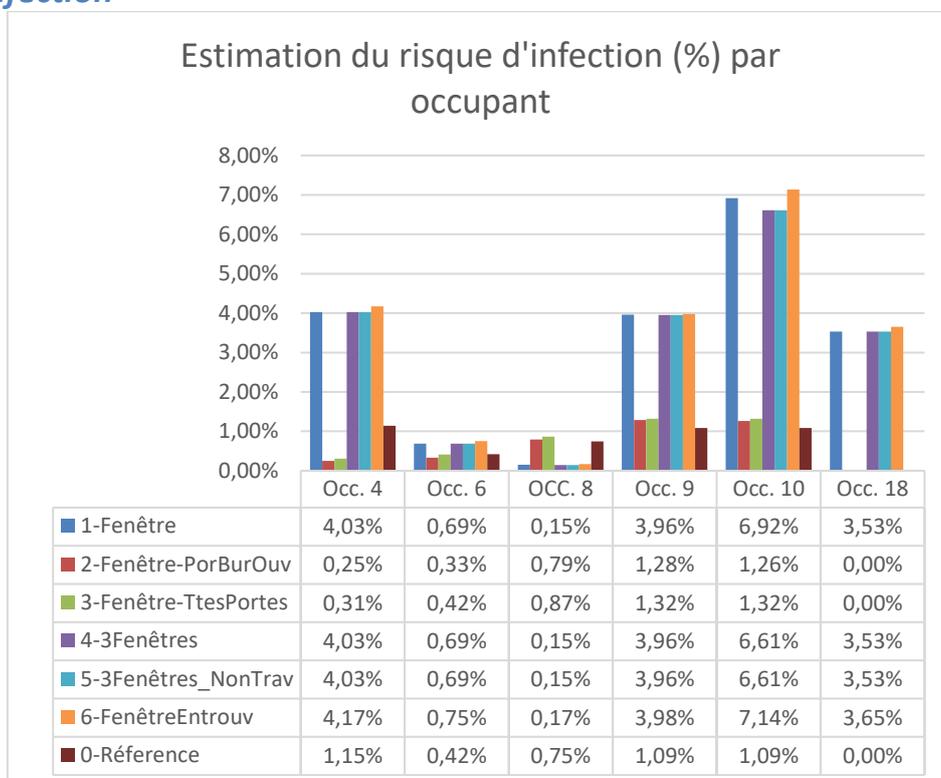


Figure 17 : Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants dans le bâtiment collectif en système double-flux auto-réglable

Les résultats des risques d'infections viennent confirmer les observations faites avec les expositions relatives :

- Dans le cas de référence, aucun occupant n'a un risque d'infection supérieur à 1,15%.
- Dans les scénarios où la porte est calfeutrée (1, 4, 5 et 6) les valeurs des risques d'infection augmentent pour tous les occupants, et atteignent près de 4% pour les occupants de la chambre voisine (occ. 4 et 9), et l'occupant de la chambre du dessous (occ. 18), et même jusqu'à 7% pour l'occupant de la chambre du dessus (occ. 10). Ceci est très problématique sachant que dans le scénario de base les risques d'exposition étaient bien plus faibles, ils étaient même quasi nul pour l'occupant 18, ces stratégies sont donc à éviter.
- Pour les stratégies de dilution (scénario 2 et 3), on observe une augmentation du risque d'exposition pour les occupants du même logement que le contaminé (occ. 8, 9, 10) et des diminutions de ces risques pour les occupants des logements voisins. Ces stratégies sont donc acceptables pour protéger les logements voisins.

Débits interzones

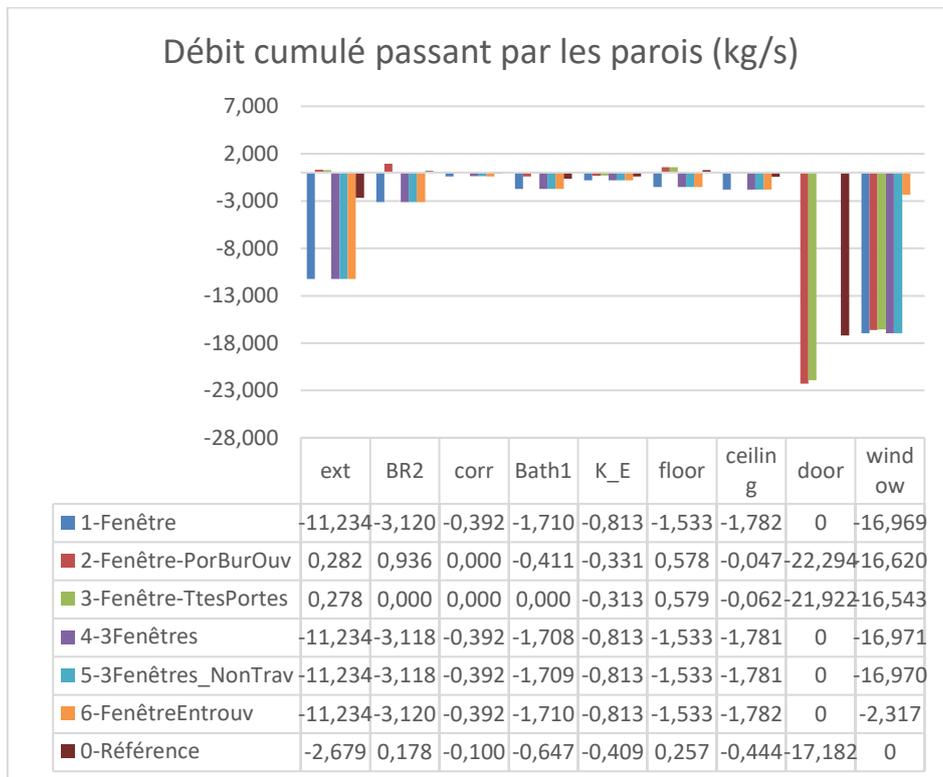


Figure 18 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confiné dans le bâtiment collectif en système double-flux

Dans le cas de référence, la fenêtre est fermée, l'air entre dans la pièce par la bouche d'insufflation à débit constant, et ressort essentiellement par la porte donnant vers le couloir, et légèrement les défauts d'étanchéité de la paroi donnant vers l'extérieur. Les mouvements d'air à travers les parois internes au bâtiment ont des amplitudes bien plus faibles. Pour rappel, dans les caractéristiques du modèle, les défauts de perméabilité des parois internes au logement sont les plus faibles. L'air est entrant par la chambre voisine et par le sol de la chambre confinée, les autres flux d'air sont sortants induisent alors un risque de transmission du virus vers les autres pièces (couloir, salle de bain, cuisine du logement voisin et chambre du logement au-dessus).

- Concernant les autres stratégies de ventilation, les résultats sont divergents pour les deux groupes de scénarios.

- On observe des débits d'air presque identiques pour les scénarios d'ouverture des fenêtres avec la porte de la chambre calfeutrée (scénario 1, 4, 5 et 6). Le calfeutrage de la porte entraîne une sortie d'air nulle à travers la porte, les débits sortants se répartissent alors sur les autres parois. Ainsi, les flux d'air cumulés sur toutes les parois deviennent sortants. La hausse des débits d'air sortant est très importante, vers l'extérieur mais aussi vers toutes les pièces du bâtiment adjacente à la chambre, en particulier vers la chambre voisine puis vers l'appartement du dessus, la salle de bain et l'appartement du dessous. Ces débits sont tout à fait cohérents avec l'évolution des risques d'infection observé chez les occupants.
- Pour les scénarios de dilution les résultats diffèrent. La porte de la chambre est ouverte, les débits d'air à travers cette porte augmentent. Alors, il n'y a pas d'augmentation importante des flux d'air à travers les défauts d'étanchéité des parois, au contraire, les flux d'air sortant sont légèrement plus faibles et les flux d'air entrants plus fort. Ainsi, pour les habitants des logements voisins, le risque d'infection baisse. Cependant pour les autres habitants du logement de référence, comme le flux d'air sortant de la porte arrive dans le couloir commun à plusieurs chambres, l'exposition des habitants de ces chambres ne diminue pas ou augmente.

3.2.2 Ventilation simple-flux

Exposition relative

De même que pour le système de ventilation double flux, on peut séparer les scénarios en deux groupes : un premier groupe avec des variations relatives très importantes, qui concerne les cas où la porte de la chambre du contaminé est calfeutrée (scénario 1, 4, 5 et 6); un deuxième groupe avec des valeurs de variations plus faibles qui correspond aux stratégies de dilution (scénario 2 et 3).

Dans tous les scénarios, au moins un occupant subit une augmentation de son exposition, nous verrons que pour certains scénarios, cette augmentation est faible.

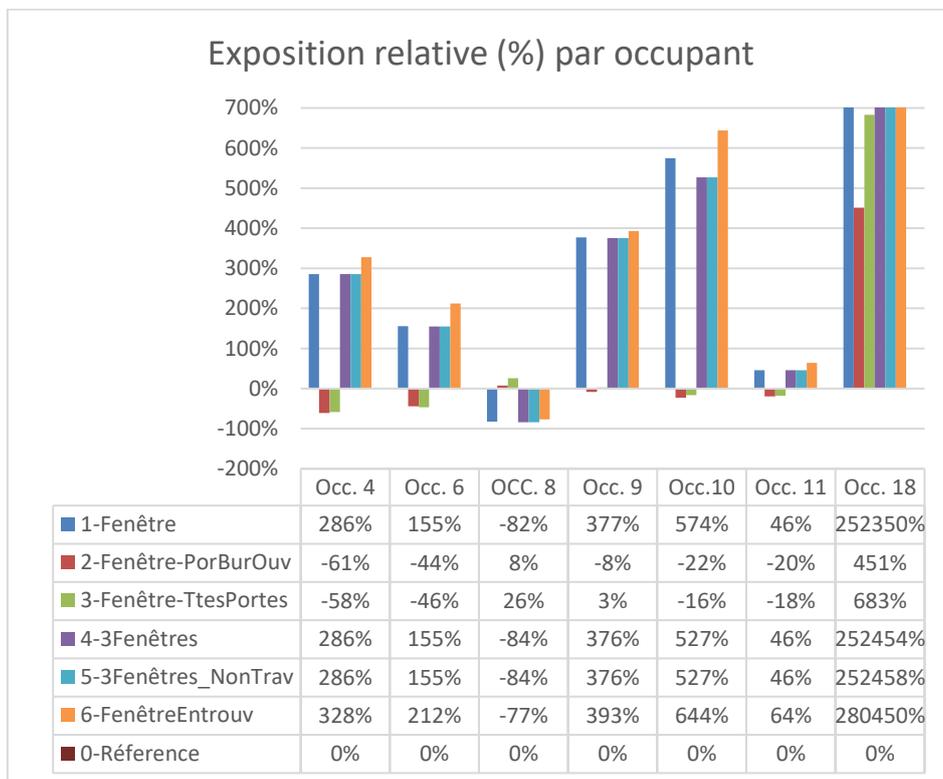


Figure 19 : Résultats d'exposition relative des occupants du bâtiment collectif en système simple-flux auto-réglable

Plus précisément, on peut noter que :

- Les différents scénarios ne sont pas tous bénéfiques même pour l'occupant en quarantaine. En effet, les scénarios 1, 4, 5 et 6 montrent que le fait de calfeutrer la porte a un impact plus fort que l'ouverture des fenêtres, alors l'exposition de l'occupant contaminé augmente, de 46% pour une fenêtre ouverte, et de 64% pour une fenêtre semi-ouverte. Dans le cas des stratégies de dilution, l'exposition de cet occupant diminue -18 à -20%.
- On observe la même répartition par occupant des taux d'augmentation extrêmes que dans le cas du système de ventilation double flux. En effet, les occupants qui habitent les pièces voisines de la chambre du contaminé voient leur exposition augmenter : ces augmentations extrêmes valent de 28040% pour l'occupant 4 (chambre 1 du dessous) à jusque 3857% pour l'occupant 18 (chambre 1 du dessus).
- Les scénarios de dilution présentent de bien meilleurs résultats. En effet, les taux d'expositions diminuent pour quatre occupants dans le scénario de dilution forte (scénario 3), de -16% à -58%, et pour 3 occupants dans le scénario de dilution faible (scénario 2), de -20 à -61%. Le scénario de dilution faible est le plus efficace puisque seul l'occupant 8 (occupant de la chambre 3 du logement de référence) est davantage exposé avec une augmentation relative de 8% qui paraît raisonnable par rapport au diminution d'exposition de tous les autres occupants. Dans le scénario de forte dilution, l'occupant 9 a subi une augmentation de 3% qui est acceptable, par rapport aux bénéfiques des autres occupants, mais l'exposition de l'occupant 8 augmente de 26%. On pourrait choisir d'accepter cette augmentation puisqu'elle concerne un seul occupant, il faudra veiller à ce qu'il ne s'agisse pas d'une personne à risque.
- Ici aussi le nombre de fenêtre ouverte n'a pas d'impact, seul l'état ouvert ou semi-ouvert de la fenêtre de la chambre du contaminé impacte les résultats.

Risque d'infection

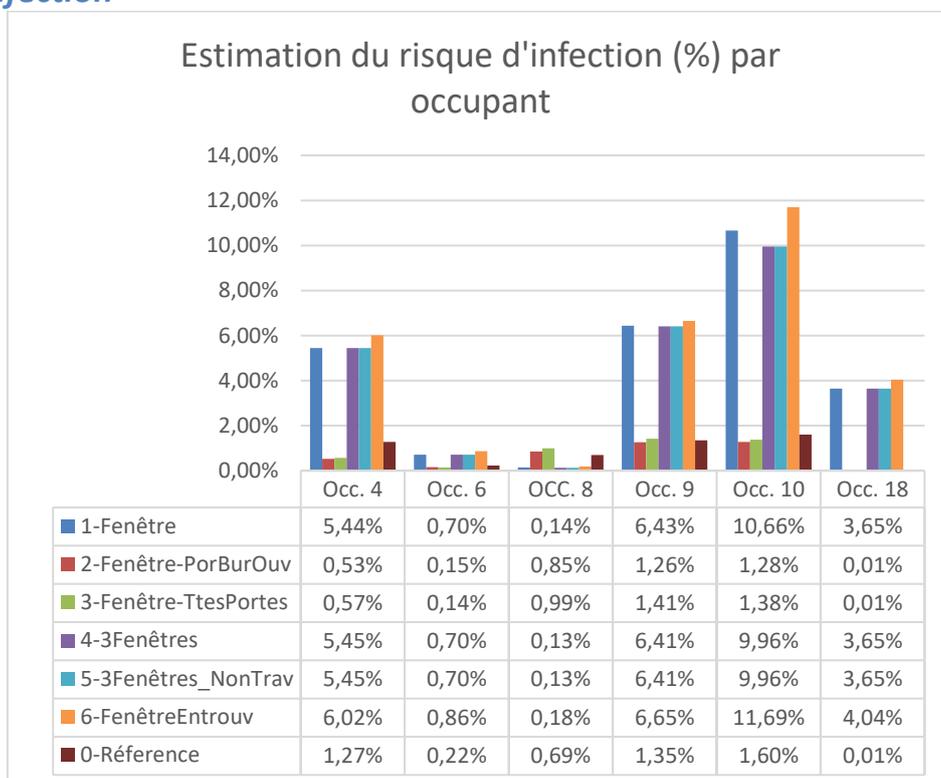


Figure 20 : Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants dans le bâtiment collectif en système simple-flux auto-réglable

On affine désormais l'étude avec le deuxième indicateur, le risque de contamination.

- Dans le scénario de référence tous les occupants ont moins de 1,65% de chance d'être infecté par le virus, il est important que les stratégies proposées n'augmentent pas ce risque.
- Or, les quatre scénarios aboutissent à des risques d'infection bien plus importants pour beaucoup d'occupants, en particulier le 4, 9 et 18, ainsi que l'occupant 10 qui est mis en danger, avec une probabilité d'infection qui atteint presque 12% pour la stratégie de semi-ouverture de la fenêtre (scénario 6). Aussi, l'occupant 18 n'était pas soumis à un risque de contamination dans le scénario de référence et ici, son risque de contamination atteint 4% et n'est plus négligeable. Ces stratégies sont à éviter.
- Les stratégies de dilution sont bien plus efficaces puisqu'elles permettent à presque tous les habitants de voir leur risque d'infection baisser. L'occupant 8 fait exception à la règle, son risque d'infection était de 0,79% dans le scénario de référence et il passe à 0,85%, et 0,99% respectivement dans les scénarios de faible et de forte dilution. L'occupant 9 voit aussi son risque augmenter avec la stratégie de forte dilution. Ces stratégies abaissent tout de même le risque de l'occupant le plus exposé donc, globalement elles sont intéressantes.

Débits interzones

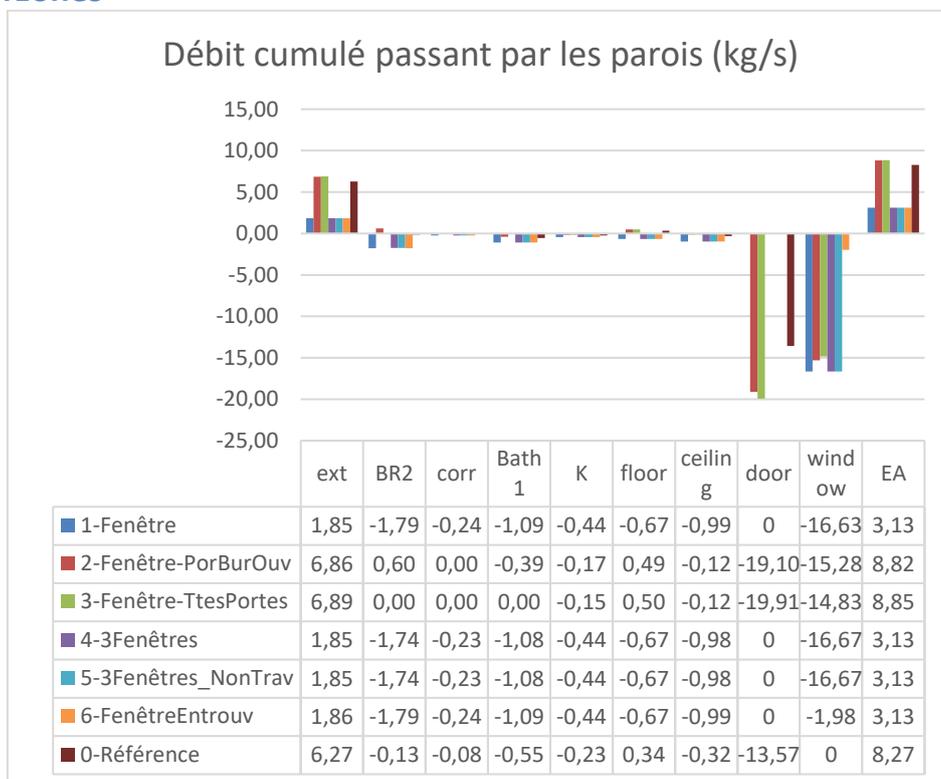


Figure 21 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confiné dans le bâtiment collectif en système simple-flux

Dans le cas de référence, l'air entre dans la chambre confinée par l'entrée d'air et par le mur extérieur, la fenêtre étant fermée. L'air sort très majoritairement par la porte de la chambre à travers son détalonnage. Les autres débits d'air sont faibles et sortant, mis à part celui de plancher qui est entrant.

- Concernant les autres stratégies de ventilation, les résultats se répartissent à nouveau en deux groupes : les stratégies de dilution (scénarios 2 et 3), et les autres stratégies.
- Dans les scénarios d'ouverture des fenêtres avec la porte de la chambre calfeutrée (scénario 1, 4, 5 et 6), les débits d'air sont presque identiques. La seule différence notable concerne le

scénario de semi-ouverture de la fenêtre, dans lequel le débit d'air entrant par cette fenêtre est bien plus faible. Dans l'ensemble de ces scénarios, comme le débit d'air à travers la porte est nul, les débits d'air sortants de la pièce se répartissent alors sur les autres parois. Alors les valeurs des débits sortants augmentent tous par rapport au scénario de référence, l'air a tendance à plus se disperser vers les pièces adjacentes, ceci est cohérent avec l'augmentation des risques d'infection observé chez les occupants de tout le bâtiment.

- Pour les scénarios de dilution, les résultats des débits d'air ne suivent pas la même logique. Le débit d'air sortant à travers la porte de la chambre qui est ouverte augmente, et au contraire, les flux d'air à travers les défauts d'étanchéité des parois sont plus faibles alors les habitants des logements voisins voient leur risque d'infection baisser. Les habitants du logement de référence ne bénéficient pas de cette baisse, en effet comme le flux d'air à travers la porte ouverte donne sur le couloir qui est adjacent aux chambres des habitants.

3.2.3 Ventilation simple flux hygroréglable

Exposition relative

Les résultats des scénarios avec le système de ventilation double-flux hygroréglable suivent des tendances très similaires à celles des résultats du système double flux. On retrouve les deux groupes de scénarios : le groupe avec des variations relatives très importantes, qui concerne les cas où la porte de la chambre du contaminé est calfeutrée (scénario 1, 4, 5 et 6); et le groupe avec des valeurs de variations plus faibles qui correspond aux stratégies de dilution (scénario 2 et 3).

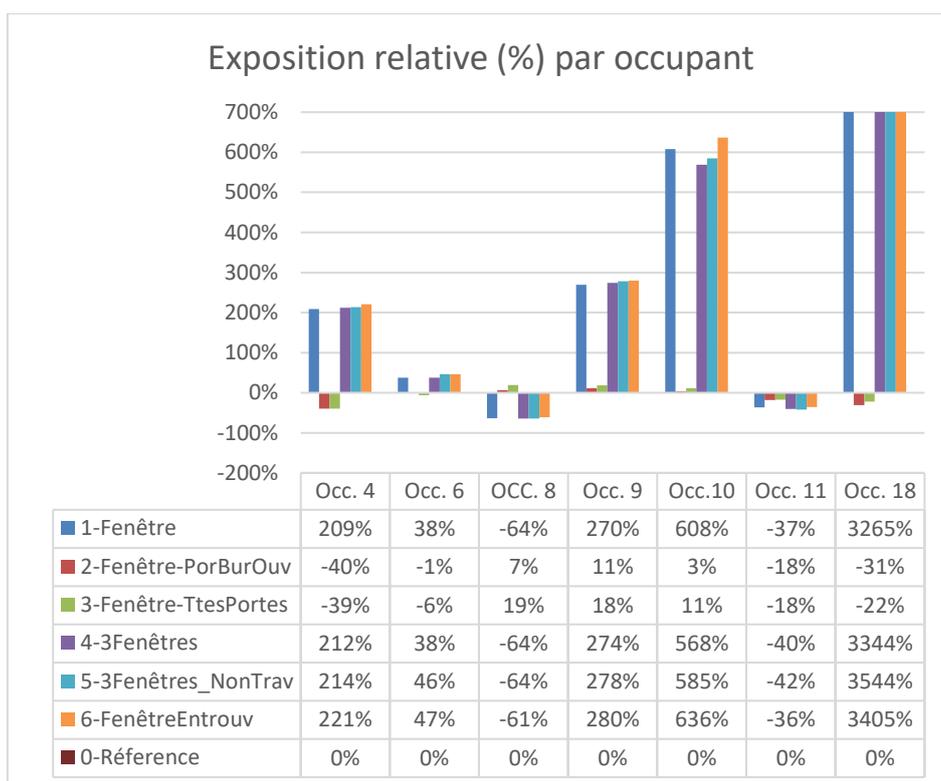


Figure 22 : Résultats d'exposition relative des occupants du bâtiment collectif en système simple-flux hygroréglable

Plus précisément, on peut noter que :

- L'occupant contaminé est moins exposé au virus pour toutes les stratégies. La diminution relative des stratégies de dilution (scénario 2 et 3) vaut -18%, alors qu'elle est plus importante pour les autres scénarios avec des valeurs de -36 à -42%.
- Les valeurs extrêmes des augmentations observées dans le cas de la porte calfeutrée sont comprises entre 209% (occ. 4) et 3544% (occ. 18) d'augmentation. Ces fortes augmentations montrent que certains occupants qui étaient très peu exposés dans le scénario de référence, subissent une augmentation qui rend leurs valeurs non négligeables dans ces scénarios (1, 4, 5 et 6). Ces scénarios sont seulement bénéfiques pour l'occupant contaminé mais aussi pour un autre occupant du logement, qui ne vit pas dans la chambre adjacente (occ. 8) et qui observe une diminution de -61 à -64% de son exposition.
- Les scénarios de dilution avec ouvertures des portes engendrent des augmentations d'expositions moins importantes, elles ne dépassent pas 18% (scénario 3, occ. 9). Pour ces stratégies, les occupants qui voient leur exposition augmenter sont uniquement les habitants du même logement que l'occupant infecté. Les occupants des logements voisins observent tous des diminutions de leur exposition allant jusqu'à -40% pour l'occupant 4. Ainsi, pour protéger les occupants des logements voisins, la stratégie de dilution semble bien adaptée même si elle agit au détriment des occupants du logement de référence.
- Aussi, le nombre de fenêtres ouvertes et l'ouverture totale ou partielle impacte légèrement les résultats. Le scénario avec ouverture des fenêtres sur la même façade (scénario 4) obtient les meilleurs résultats avec des augmentations d'exposition plus faibles dans l'ensemble, et que le scénario de semi-ouverture de la fenêtre (scénario 6) obtient les moins bons résultats, cependant les quatre scénarios ont des résultats très proches pour tous les occupants.

Risque d'infection

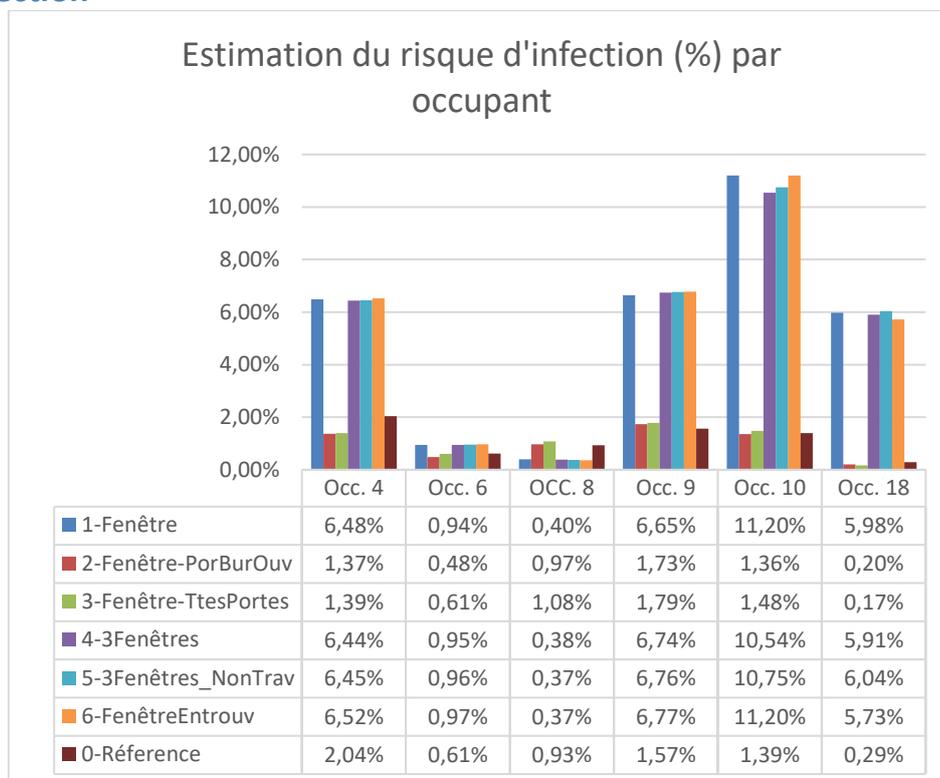


Figure 23 : Résultats d'estimation du risque d'infection des occupants dans le bâtiment collectif en système simple-flux hygroréglable

Pour finir, on complète l'analyse avec le deuxième indicateur, le risque d'infection.

- Dans le scénario de base, le risque de contamination est inférieur à 2% pour tous les occupants.

- De la même manière que pour l'étude des autres systèmes de ventilation, le fait de calfeutrer la porte est dommageable pour beaucoup d'habitants, en particulier le 4, le 9, le 10 et le 18, les risques de contaminations augmentent jusqu'à 11,2% (occ. 10, scénario 1 et 6).
- Ici, le scénario de dilution permet de diminuer le risque pour l'occupant 4 ayant un risque d'infection le plus important dans le scénario de référence. En effet, cette valeur diminue de 2 à 1,4% de risque d'infection. Cependant, ces scénarios, en particulier celui de forte dilution augmente les risques des autres occupants. Ils restent efficaces pour protéger les occupants des logements des voisins.

Débits interzones

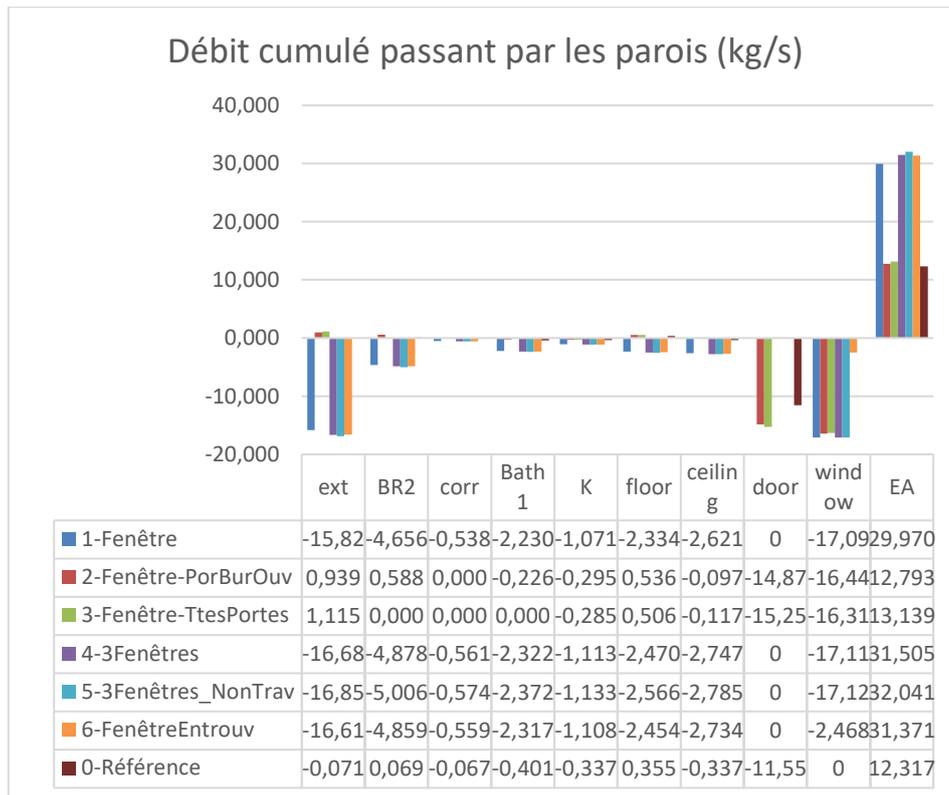


Figure 24 : Répartition des flux d'air entrant et sortant de la chambre du confinée dans le bâtiment collectif en système simple-flux hygroréglable

Dans le cas de référence, l'air entre dans la chambre confinée par l'entrée d'air, la fenêtre est fermée. L'air sort très majoritairement par la porte de la chambre à travers son détalonnage. Les autres débits d'air sont très faibles et sortant, mis à part celui de plancher et celui de la chambre voisine qui sont entrants.

- En comparant les résultats des autres stratégies de ventilation, deux groupes se forment : les stratégies de dilution (scénarios 2 et 3), et les autres stratégies.
- Dans les scénarios d'ouverture des fenêtres avec la porte de la chambre calfeutrée (scénario 1, 4, 5 et 6), les débits d'air suivent les mêmes tendances. Seulement le cas de la semi ouverture de la fenêtre entraine un débit d'air sortant par la fenêtre bien plus faible que dans les autres scénarios. La porte est calfeutrée alors le débit d'air à travers est nul, les débits d'air sortants de la chambre se répartissent sur les autres parois. Ainsi, les flux d'air sortants augmentent tous par rapport au scénario de référence avec des augmentations parfois très importantes. Ainsi, il y a plus d'air sortant du bâtiment mais il y a également

beaucoup plus d'air sortant vers les autres pièces du bâtiment, ceci explique l'augmentation des risques d'infection observé chez les occupants de tout le bâtiment.

Pour les scénarios de dilution les résultats sont différents. L'air sortant de la pièce par la porte ouverte et vers le couloir augmente. Ainsi, comme le couloir est commun aux autres chambres du logement de référence, les occupants de ces chambres voient leur risque d'infection augmenter. Cependant, les flux d'air à travers les défauts d'étanchéité des parois diminuent donc les occupants des logements voisins sont moins susceptible de se faire contaminer.

3.2.4 Bilan pour le bâtiment collectif

Ainsi, l'indicateur d'exposition relative, pour les 3 systèmes de ventilation, met en évidence des variations d'exposition des occupants au virus extrêmes par rapport aux valeurs du scénario de référence. Ces écarts concernent essentiellement les scénarios où la porte de la chambre de quarantaine avec la personne infectée est calfeutrée, c'est-à-dire tous les scénarios sauf les scénarios de dilution où cette même porte est ouverte sur le reste de l'appartement (scénarios 2 et 3). Pour la plupart des occupants, du logement de l'occupant infecté et des logements voisins, l'exposition est alors fortement augmentée. Il pourrait s'agir d'occupants qui étaient très peu exposés au virus dans le scénario de référence. C'est l'étude complémentaire des résultats des risques d'infection qui permettra de statuer sur cette hypothèse. Avec ces premiers éléments, on déconseille fortement toutes stratégies où la porte de la chambre de quarantaine est calfeutrée.

Concernant les scénarios de dilution, ils permettent de diminuer l'exposition des occupants des logements voisins pour tous les systèmes de ventilation. Cependant, ils augmentent en général l'exposition des colocataires de la personne infectée dans le logement de référence. Alors cette stratégie pourrait être intéressante pour limiter la propagation du virus entre les logements, mais pas à l'intérieur même du logement où réside l'occupant contaminé.

L'analyse des résultats calculés des risques d'infection a permis d'affiner notre analyse.

Les résultats des risques d'infection confirment les conclusions élaborées à partir des expositions relatives. La mesure de calfeutrage de la porte de la chambre confinée, même si elle est combinée avec une ouverture de fenêtre, augmente la transmission du virus vers les habitants des pièces voisines. Ainsi, des occupants qui n'étaient pas exposés au virus dans le scénario de référence, voient leur risque fortement augmenter. Ces solutions sont donc à éviter.

Dans le scénario de référence, on remarque pour tous les systèmes de ventilation, que trois occupants sont plus à risque que les autres : les occupants de la chambre parentale, adjacente à la chambre confinée et l'occupant de la chambre du logement voisin en dessous. Les scénarios de dilution n'abaissent pas le risque des habitants de la chambre parentale, mais ils permettent de protéger l'occupant du logement en dessous. Malgré le fait que cette protection se fasse quelque peu au détriment des colocataires du malade, les stratégies semblent intéressantes pour limiter la propagation entre logements.

L'analyse des débits interzones permet d'expliquer et de comprendre ces résultats, en estimant l'impact des ouvertures des fenêtres et des portes sur ces débits par rapport à la situation de référence.

4. Discussion et perspectives

En réponse à la recommandation largement diffusée d'ouvrir les fenêtres - y compris la fenêtre d'une pièce où une personne infectée est en quarantaine - afin d'augmenter la dilution du virus et d'éviter la contamination dans les habitations, nous avons montré que cette stratégie peut être très efficace mais doit être considérée avec prudence. En effet, dans le cas de la maison individuelle, avec un système de ventilation double-flux ou un système de ventilation simple-flux hygroréglable, elle a toujours un impact positif. Au contraire, avec un système de ventilation simple flux auto-réglable, largement installé dans le parc immobilier résidentiel d'Europe occidentale [89], cette stratégie peut augmenter l'exposition de certains occupants, en fonction de l'endroit où ils se trouvent. Ceci est principalement dû aux fuites d'air entre les pièces voisines à des débits plus importants en raison des différences de pression plus élevées causées par l'ouverture des fenêtres. Ces résultats sont d'autant plus marqués dans le cas du bâtiment collectif où l'ouverture des fenêtres peut entraîner une très forte surexposition au virus pour certains occupants, notamment des occupants des logements voisins. L'ouverture des fenêtres provoque une surexposition pour plusieurs habitants du bâtiment avec chacun des trois systèmes de ventilation étudiés.

Les surexpositions observées se traduisent par des augmentations du risque d'infection des occupants. La comparaison des valeurs des risques d'infection entre les différents occupants permet de déterminer quelles stratégies favorisent ou défavorisent les occupants qui sont déjà les plus à risque dans les logements. Elles permettent notamment de trouver l'intérêt des stratégies de dilution qui aurait été mises de côté avec la simple étude des expositions relatives. Par exemple, dans l'étude de la maison individuelle avec un système de ventilation simple flux, même si l'exposition de certains occupants est augmentée, cette stratégie est intéressante car elle abaisse le risque maximum d'exposition de l'occupant le plus exposé. Dans le cas du bâtiment collectif, l'estimation du risque d'infection permet de montrer la dangerosité de l'ouverture des fenêtres, notamment pour des occupants des logements voisins qui avait un risque nul d'être infectés dans le cas de base.

Cependant, le modèle comporte des limites.

Cette étude est focalisée sur la transmission du virus par aérosols mais il existe d'autres vecteurs comme la transmission par expulsion direct de gouttes ou gouttelettes dans les yeux, la bouche ou le nez d'un individu se trouvant à proximité, ou comme la transmission via un contact sur des surfaces ayant reçu des particules de virus, l'importance des différents modes de transmission est encore relativement mal connus. Même s'il a été prouvé que la transmission par voie aérienne a un rôle majeur à travers différents exemples dans le monde, il est encore difficile de prouver qu'une personne peut être infectée dans une pièce longtemps après que l'individu malade ayant émis les particules de virus ait quitté cette pièce. De plus, la majorité des cas prouvant la transmission aérienne du virus concernent des pièces peu ventilées [9].

Il convient de rappeler que les modèles développés donnent des tendances, mais il ne s'agit que de modèles, qui reposent sur de nombreuses hypothèses. Les chiffres avancés ont toujours une part d'incertitude, dans les faits il existe toujours une possibilité de transmission du virus lorsqu'une personne est infectée.

Dans le modèle de notre étude, l'émission des particules virales a été très simplifiée. Le taux d'émission est constant alors qu'en réalité une personne qui tousse, par exemple, émettra un taux

de quantas plus important qu'en respirant. Chacune des valeurs d'entrées du modèle contient une part d'incertitude.

Le premier facteur d'incertitude concerne la quantité d'aérosols émise par une personne. Une étude sur la grippe montre que la variabilité de l'émission des particules de virus peut être très importante entre les différents individus. Certains individus expirent presque aucune particule virale alors que d'autres en expirent énormément. Il n'y a aucun moyen d'identifier ces individus particuliers, mais l'avancement de la maladie ou des caractéristiques individuelles de chacun peuvent faire partie des facteurs [90]. Le taux d'inhalation est également propre à chaque individu et varie dans le temps.

Le taux de déposition du virus serait aussi variable et dépendrait notamment de la taille des particules, et du mode d'émission. En toussant, les individus émettraient des aérosols capables de voyager sur de plus longues distances. [14]

D'autres hypothèses du modèle mise en place sont également discutables. D'abord, il aurait été préférable de disposer d'un bâtiment collectif avec des mesures de perméabilités détaillés. Les valeurs implémentées dans notre modélisation proviennent d'une étude canadienne [73] alors que le bâtiment étudié se situe en France. Ces valeurs sont très basses pour les parois entre deux logements.

Aussi, la modélisation de la porte calfeutrée ne laisse passer aucun flux d'air. Dans la réalité, ceci est impossible, on pourrait alors étudier la variabilité des résultats en modélisant cette fois la porte calfeutrée par une porte avec un détalonnage d'une hauteur extrêmement faible.

Pour finir, tous les calculs du modèle reposent sur l'hypothèse de distribution homogène de l'air en concentration, en température et en pression.

Conclusion

La ventilation des bâtiments est un sujet de recherche important en raison des enjeux énergétiques et sanitaires qui lui sont attachés. Aujourd'hui, un nouvel enjeu de la ventilation émerge avec le contexte de pandémie mondiale du Covid-19. En effet, il est maintenant établi qu'un mode de transmission du virus SARS-CoV-2 est la voie aérienne. Lorsque nous parlons, crions ou éternuons nous émettons des particules fines, les plus petites, nommées aérosols qui sont capables de se déplacer dans l'air. La ventilation a un rôle important sur les flux d'aérosols dans le bâtiment. Elle peut engendrer un risque notamment dans le cas de système avec usage du recyclage d'air, mais elle peut également devenir un outil de lutte contre la propagation du virus. De nombreuses recommandations du type « bien aérer », « bien ventiler » ou « ouvrir les fenêtres » sont largement diffusées aujourd'hui. Cependant, il convient de bien définir ces « bonnes conditions d'aération » afin d'obtenir les résultats attendus.

Dans notre étude, nous avons testé la recommandation d'ouverture des fenêtres d'une zone hautement contaminée, et ses conséquences sur les déplacements d'air et d'aérosols contaminés dans les autres zones du bâtiment. Nous avons voulu, premièrement, étudier l'impact du passage d'une conception classique de la ventilation basée sur des flux d'air circulant des zones habituellement les moins polluées (chambres, salons, bureaux, salles de classe) vers les plus polluées (salles de bain, toilettes, cuisine), à un contexte épidémique où les zones habituellement peu polluées peuvent devenir des zones fortement contaminées. Deuxièmement, nous souhaitons quantifier l'impact de la recommandation généralisée de l'ouverture des fenêtres sur les circuits de ventilation, et plus généralement sur l'exposition des occupants à un aérosol contaminé et le risque d'infection qui en découle.

Deux bâtiments résidentiels ont été modélisés, une maison et un appartement issus d'un bâtiment collectif. L'étude est programmée sur période hivernale de confinement de la population. Dans ce contexte, un habitant de chaque logement est considéré infecté et isolé dans une chambre. Nous avons soumis à ce modèle la recommandation de l'ouverture de la fenêtre dans la pièce de quarantaine.

Afin d'étudier la sensibilité de nos résultats, nous avons considéré trois types de systèmes de ventilation et analysé l'impact de six stratégies différentes d'ouverture des fenêtres et des portes. Le mouvement d'un virus dans l'air sous forme aérosol est représenté de façon simplifiée par la modélisation du transport des particules contaminées.

Les résultats ont montré que l'ouverture des fenêtres n'avait pas toujours un impact positif sur l'exposition de tous les occupants du bâtiment. Au contraire, dans certains cas, même si cette ouverture fait toujours baisser la concentration en virus de la pièce du contaminé, les pièces alentours voient des modifications des directions et des intensités des flux d'air, qui favorisent parfois la propagation du virus. Dans le cas de la maison individuelle en système de ventilation simple-flux, l'ouverture de la fenêtre entraîne une hausse de l'exposition de l'occupant le plus susceptible d'être infecté, c'est-à-dire l'occupant de la chambre au-dessus de celle du confiné. Dans le cas du bâtiment collectif, l'ouverture d'une fenêtre peut également augmenter fortement l'exposition de plusieurs occupants au virus, y compris des occupants des logements voisins. Les stratégies de dilution engendrent souvent des débits d'air et des résultats d'exposition qui sont bénéfiques pour certains occupants, mais qui ont un impact négatif sur d'autres. Elles sont alors intéressantes dans certains cas lorsque les occupants qui voient leur risque d'infection baisser sont les plus exposés au virus, ou pour la mise en place de stratégies de protection d'un unique habitant du logement.

Ces résultats pourraient être approfondis en expérimentant d'autres conditions météorologiques (par exemple, des zones avec des vents forts), d'autres types de systèmes de ventilation et d'autres types de bâtiments. Ils soulignent néanmoins l'importance de prendre en compte les transferts aérauliques entre les différentes zones d'un bâtiment afin de mieux prévenir la transmission des virus.

Bibliographie

- [1] Z. Noorimotlagh, N. Jaafarzadeh, S. S. Martínez, et S. A. Mirzaee, « A systematic review of possible airborne transmission of the COVID-19 virus (SARS-CoV-2) in the indoor air environment », *Environ. Res.*, vol. 193, p. 110612, févr. 2021, doi: 10.1016/j.envres.2020.110612.
- [2] « WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard ». <https://covid19.who.int> (consulté le sept. 05, 2021).
- [3] « Covid-19 : l'aération des pièces rejoint officiellement la liste des gestes barrières », *www.rtl.fr*. <https://www.rtl.fr/actu/bien-etre/covid-19-l-aeration-des-pieces-rejoint-officiellement-la-liste-des-gestes-barrieres-7800908232> (consulté le sept. 02, 2021).
- [4] L. Bourouiba, « Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19 », *JAMA*, mars 2020, doi: 10.1001/jama.2020.4756.
- [5] N. R. Jones, Z. U. Qureshi, R. J. Temple, J. P. J. Larwood, T. Greenhalgh, et L. Bourouiba, « Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in covid-19? », *BMJ*, vol. 370, août 2020, doi: 10.1136/bmj.m3223.
- [6] A. Fernstrom et M. Goldblatt, « Aerobiology and its role in the transmission of infectious diseases », *J. Pathog.*, vol. 2013, p. 493960, 2013, doi: 10.1155/2013/493960.
- [7] « Comment-le-coronavirus-se-propage-dans-lair-illustration-par-3-scenarios.pdf ». Consulté le: août 27, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.massoins.fr/wp-content/uploads/2020/11/Comment-le-coronavirus-se-propage-dans-lair-illustration-par-3-scenarios.pdf>
- [8] « Maladie à coronavirus 2019 (COVID-19) : comment se transmet la COVID-19 ? » <https://www.who.int/fr/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted> (consulté le sept. 01, 2021).
- [9] P. C. Noakes, « Modelling uncertainty in airborne SARS-CoV-2 risks », p. 13.
- [10] E. P. Vejerano et L. C. Marr, « Physico-chemical characteristics of evaporating respiratory fluid droplets », *J. R. Soc. Interface*, vol. 15, n° 139, p. 20170939, févr. 2018, doi: 10.1098/rsif.2017.0939.
- [11] N. R. Jones, Z. U. Qureshi, R. J. Temple, J. P. J. Larwood, T. Greenhalgh, et L. Bourouiba, « Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in covid-19? », *BMJ*, vol. 370, août 2020, doi: 10.1136/bmj.m3223.
- [12] L. Bourouiba, E. Dehandschoewercker, et J. W. M. Bush, « Violent expiratory events: on coughing and sneezing », *J. Fluid Mech.*, vol. 745, p. 537-563, avr. 2014, doi: 10.1017/jfm.2014.88.
- [13] C. Lok, « The snot-spattered experiments that show how far sneezes really spread », *Nat. News*, vol. 534, n° 7605, p. 24, juin 2016, doi: 10.1038/534024a.
- [14] L. Bourouiba, « Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19 », *JAMA*, mars 2020, doi: 10.1001/jama.2020.4756.
- [15] J. W. Tang *et al.*, « Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus (SARS-CoV-2) », *J. Hosp. Infect.*, vol. 0, n° 0, janv. 2021, doi: 10.1016/j.jhin.2020.12.022.
- [16] R. Zhang, Y. Li, A. L. Zhang, Y. Wang, et M. J. Molina, « Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19 », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 117, n° 26, p. 14857-14863, juin 2020, doi: 10.1073/pnas.2009637117.
- [17] « It Is Time to Address Airborne Transmission of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) | Clinical Infectious Diseases | Oxford Academic ». <https://academic.oup.com/cid/article/71/9/2311/5867798?login=true> (consulté le sept. 01, 2021).
- [18] M. Z. Bazant et J. W. M. Bush, « A guideline to limit indoor airborne transmission of COVID-19 », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 118, n° 17, avr. 2021, doi: 10.1073/pnas.2018995118.
- [19] N. van Doremalen *et al.*, « Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1 », *N. Engl. J. Med.*, vol. 0, n° 0, p. null, mars 2020, doi: 10.1056/NEJMc2004973.
- [20] Y. Li *et al.*, « Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant », *Infectious Diseases (except HIV/AIDS)*, preprint, avr. 2020. doi: 10.1101/2020.04.16.20067728.

- [21] S. Soucheray, « Unmasked: Experts explain necessary respiratory protection for COVID-19 », *CIDRAP*, févr. 13, 2020. <http://www.cidrap.umn.edu/news-perspective/2020/02/unmasked-experts-explain-necessary-respiratory-protection-covid-19> (consulté le mars 23, 2020).
- [22] N. Eichler *et al.*, « Early Release - Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 during Border Quarantine and Air Travel, New Zealand (Aotearoa) - Volume 27, Number 5—May 2021 - Emerging Infectious Diseases journal - CDC », doi: 10.3201/eid2705.210514.
- [23] H. Fineberg, « Rapid Expert Consultation on the Possibility of Bioaerosol Spread of SARS-CoV-2 for the COVID-19 Pandemic ». avr. 01, 2020. doi: 10.17226/25769.
- [24] L. Morawska et J. Cao, « Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality », *Environ. Int.*, vol. 139, p. 105730, juin 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105730.
- [25] Y. Li *et al.*, « Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant », *Build. Environ.*, vol. 196, p. 107788, juin 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107788.
- [26] Y. Shen *et al.*, « Community Outbreak Investigation of SARS-CoV-2 Transmission Among Bus Riders in Eastern China », *JAMA Intern. Med.*, vol. 180, n° 12, p. 1665-1671, déc. 2020, doi: 10.1001/jamainternmed.2020.5225.
- [27] « Aerosol transmission of Covid-19: A room, a bar and a classroom: how the coronavirus is spread through the air | Society | EL PAÍS in English ». <https://english.elpais.com/society/2020-10-28/a-room-a-bar-and-a-class-how-the-coronavirus-is-spread-through-the-air.html> (consulté le nov. 13, 2020).
- [28] S. E. Hwang, J. H. Chang, B. Oh, et J. Heo, « Possible aerosol transmission of COVID-19 associated with an outbreak in an apartment in Seoul, South Korea, 2020 », *Int. J. Infect. Dis.*, vol. 104, p. 73-76, mars 2021, doi: 10.1016/j.ijid.2020.12.035.
- [29] M. Jayaweera, H. Perera, B. Gunawardana, et J. Manatunge, « Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy », *Environ. Res.*, vol. 188, p. 109819, sept. 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.109819.
- [30] WHO, « Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions ». juill. 09, 2020. Consulté le: juill. 28, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.who.int/publications-detail-redirect/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>
- [31] « Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19: first update », *European Centre for Disease Prevention and Control*, nov. 11, 2020. <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/heating-ventilation-air-conditioning-systems-covid-19> (consulté le sept. 01, 2021).
- [32] CDC, « Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) », *Centers for Disease Control and Prevention*, févr. 11, 2020. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html> (consulté le sept. 01, 2021).
- [33] A. Zeghnoun, F. Dor, et A. Grégoire, « Description du budget espace-temps et estimation de l'exposition de la population française dans son logement », *Inst. Veille Sanit. Qual. L'air Intér. Dispon. Sur Www Air-Interieur Org*, 2010, Consulté le: août 04, 2016. [En ligne]. Disponible sur: http://www.oqai.fr/userdata/documents/298_InVS_OQAI_BET_Logements_2010_Internet.pdf
- [34] S. Kirchner *et al.*, « Indoor air quality in French dwellings », in *Indoor Air 2008*, Copenhagen, Denmark, août 2008, p. Paper ID 574, 8 pages. Consulté le: sept. 01, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00688556>
- [35] WHO, « Burden of disease from Household Air Pollution for 2012 », World Health Organization, 2014. Consulté le: nov. 28, 2016. [En ligne]. Disponible sur: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/FINAL_HAP_AAP_BoD_24March2014.pdf
- [36] S. Domínguez-Amarillo, J. Fernández-Agüera, S. Cesteros-García, et R. A. González-Lezcano, « Bad Air Can Also Kill: Residential Indoor Air Quality and Pollutant Exposure Risk during the COVID-19 Crisis », *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, n° 19, Art. n° 19, janv. 2020, doi: 10.3390/ijerph17197183.
- [37] Maria.Kapsalaki, « VIP 38: What is smart ventilation? », *AIVC*, mars 08, 2018. <https://www.aivc.org/resource/vip-38-what-smart-ventilation> (consulté le sept. 05, 2021).

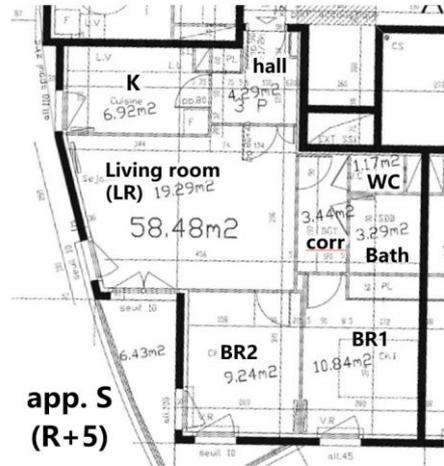
- [38] G. Guyot, I. Walker, et M. Sherman, « Performance based approaches in standards and regulations for smart ventilation in residential buildings: a summary review », *Int. J. Vent.*, vol. 18, p. 1-17, mars 2018, doi: 10.1080/14733315.2018.1435025.
- [39] G. Correia, L. Rodrigues, M. Gameiro da Silva, et T. Gonçalves, « Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission », *Med. Hypotheses*, vol. 141, p. 109781, août 2020, doi: 10.1016/j.mehy.2020.109781.
- [40] H. Dai et B. Zhao, « Association of infected probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces: a Wells-Riley equation based investigation », *Emergency Medicine*, preprint, avr. 2020. doi: 10.1101/2020.04.21.20072397.
- [41] B. Jones, P. Sharpe, C. Iddon, E. A. Hathway, C. J. Noakes, et S. Fitzgerald, « Modelling uncertainty in the relative risk of exposure to the SARS-CoV-2 virus by airborne aerosol transmission in well mixed indoor air », *Build. Environ.*, vol. 191, p. 107617, mars 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107617.
- [42] REHVA, « REHVA COVID- 19 guidance document-update 1 ». avr. 03, 2020. Consulté le: mars 23, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_covid_guidance_document_2020-03-17_final2.pdf
- [43] INIVE eei, *Similarities and differences between REHVA's & ASHRAE's guidance (Valérie Leprince)*, (nov. 23, 2020). Consulté le: sept. 05, 2021. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=FV1QaezyDwM>
- [44] « guidance-for-residential-buildings.pdf ». Consulté le: sept. 01, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/guidance-for-residential-buildings.pdf>
- [45] G. Guyot et R. Jobert, *Detailed analysis of regulatory compliance controls of 1287 dwellings ventilation systems*. 2013.
- [46] G. N. Sze To et C. Y. H. Chao, « Review and comparison between the Wells–Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases », *Indoor Air*, vol. 20, n° 1, p. 2-16, févr. 2010, doi: 10.1111/j.1600-0668.2009.00621.x.
- [47] « AIRBORNE SPREAD OF MEASLES IN A SUBURBAN ELEMENTARY SCHOOL | American Journal of Epidemiology | Oxford Academic ». <https://academic.oup.com/aje/article-abstract/107/5/421/58522> (consulté le août 31, 2021).
- [48] W. F. Wells, « Airborne Contagion and Air Hygiene. An Ecological Study of Droplet Infections. », *Airborne Contag. Air Hyg. Ecol. Study Droplet Infect.*, 1955, Consulté le: août 31, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19562701497>
- [49] S. Zhang et Z. Lin, « Dilution-based evaluation of airborne infection risk - Thorough expansion of Wells-Riley model », *Build. Environ.*, vol. 194, p. 107674, mai 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107674.
- [50] G. Buonanno, L. Stabile, et L. Morawska, « Estimation of airborne viral emission: quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment », *Infectious Diseases (except HIV/AIDS)*, preprint, avr. 2020. doi: 10.1101/2020.04.12.20062828.
- [51] L. F. Pease *et al.*, « Investigation of potential aerosol transmission and infectivity of SARS-CoV-2 through central ventilation systems », *Build. Environ.*, vol. 197, p. 107633, juin 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107633.
- [52] « REHVA_COVID-19_Ventilation_Calculator_user_guide.pdf ». Consulté le: mai 17, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.rehva.eu/fileadmin/content/documents/Downloadable_documents/REHVA_COVID-19_Ventilation_Calculator_user_guide.pdf
- [53] « airbornedotcam.pdf ». Consulté le: mai 17, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://airborne.cam/airbornedotcam.pdf>
- [54] P. M. de Oliveira, L. C. C. Mesquita, S. Gkantonas, A. Giusti, et E. Mastorakos, « Evolution of spray and aerosol from respiratory releases: theoretical estimates for insight on viral transmission », p. 22.
- [55] W. S. Dols, B. J. Polidoro, D. Poppendieck, et S. J. Emmerich, « A tool to model the Fate and Transport of Indoor Microbiological Aerosols (FaTIMA) », National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST TN 2095, juin 2020. doi: 10.6028/NIST.TN.2095.

- [56] « COVID-19 Multi-Room calculator », *REHVA*. <https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance/covid-19-multi-room-calculator> (consulté le sept. 05, 2021).
- [57] « CETE-sensibilisation.pdf ». Consulté le: sept. 05, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.alec-montpellier.org/wp-content/uploads/2018/02/CETE-sensibilisation.pdf>
- [58] G. Guyot, J. Ferlay, E. Gonze, M. Woloszyn, P. Planet, et T. Bello, « Multizone air leakage measurements and interactions with ventilation flows in low-energy homes », *Build. Environ.*, vol. 107, p. 52-63, oct. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.07.014.
- [59] A. Persily et L. de Jonge, « Carbon dioxide generation rates for building occupants », *Indoor Air*, vol. 27, n° 5, p. 868-879, 2017, doi: 10.1111/ina.12383.
- [60] A. S. of H. Engineers Refrigerating and Air-Conditioning, *ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) Handbook and Product Directory -- Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- [61] « FD CEN/TR 14788 - Ventilation des bâtiments - Conception et dimensionnement des systèmes de ventilation résidentiels - Août 2006 ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/fd-cen-tr-14788/ventilation-des-batiments-conception-et-dimensionnement-des-systemes-de-ventilation-residentiels/article/745361/fa103875> (consulté le sept. 01, 2021).
- [62] B. Poirier, G. Guyot, H. Geoffroy, M. Woloszyn, M. Ondarts, et E. Gonze, « Pollutants emission scenarios for residential ventilation performance assessment. A review », *J. Build. Eng.*, vol. 42, p. 102488, oct. 2021, doi: 10.1016/j.jobee.2021.102488.
- [63] « Snapshot ». Consulté le: sept. 01, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nist.gov/services-resources/software/contam>
- [64] S. J. Emmerich, « Validation of multizone IAQ modeling of residential-scale buildings: A review/Discussion », *Ashrae Trans.*, vol. 107, p. 619, 2001.
- [65] Y. L. Chen et J. Wen, « The selection of the most appropriate airflow model for designing indoor air sensor systems », *Build. Environ.*, vol. 50, p. 34-43, avr. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.10.007.
- [66] « ASHRAE International Weather Files for Energy Calculations 2.0 (IWEC2) ». <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/ashrae-international-weather-files-for-energy-calculations-2-0-iwec2> (consulté le sept. 05, 2021).
- [67] A. B. Mélois, B. Moujalled, G. Guyot, et V. Leprince, « Improving building envelope knowledge from analysis of 219,000 certified on-site air leakage measurements in France », *Build. Environ.*, vol. 159, p. 106145, juill. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.05.023.
- [68] A. Afshari, B. Shi, N. C. Bergsøe, L. Ekberg, et T. Larsson, « Quantification of ultrafine particles from second-hand tobacco smoke infiltration », in *Proceedings of the CLIMA 2010 Conference: 10th REHVA World Congress « Sustainable Energy use in Buildings »*, 2010, p. 8.
- [69] A. Gunner, S. Ardkapan, A. Afshari, et N. Bergsøe, « Transfer of Ultrafine Particles and Air in Multi-storey Buildings », *J. Civ. Eng. Archit.*, vol. 8, avr. 2014, doi: 10.17265/1934-7359/2014.04.001.
- [70] D. L. Bohac, M. J. Hewett, J. E. Fitzgerald, et D. Grimsrud, « Measured Change in Multifamily Unit Air Leakage and Airflow Due to Air Sealing and Ventilation Treatments », 2007, p. 13.
- [71] P. Levin, « Building technology and air flow control in housing », janv. 1991, Consulté le: sept. 05, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/7817857>
- [72] G. Finch, J. Straube, et C. Genge, « Air leakage within multi-unit residential buildings : testing and implications for building performance », Montreal, Quebec, 2009, p. 16.
- [73] C. H. Lozinsky et M. F. Touchie, « Suite-level air tightness and compartmentalization in multi-unit residential buildings: How do we achieve our intended goals? », *Build. Environ.*, vol. 192, p. 107600, avr. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107600.
- [74] « guide-pratique-ventilation-logement-confortable-sain.pdf ». Consulté le: sept. 05, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/cadic/1761/guide-pratique-ventilation-logement-confortable-sain.pdf?modal=false>
- [75] E. Jardinier, F. Parsy, G. Guyot, et S. Berthin, « Long-term durability of humidity-based demand-controlled ventilation: results of a ten years monitoring in residential buildings », p. 12.
- [76] « ao4172267_v2.pdf ». Consulté le: sept. 05, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://pro.aldes.fr/media/10031/ao4172267_v2.pdf
- [77] B. Poirier, « Étude numérique de la performance de la ventilation intelligente: développement d'un modèle de ventilation hygroréglable en maison basse consommation », p. 52.

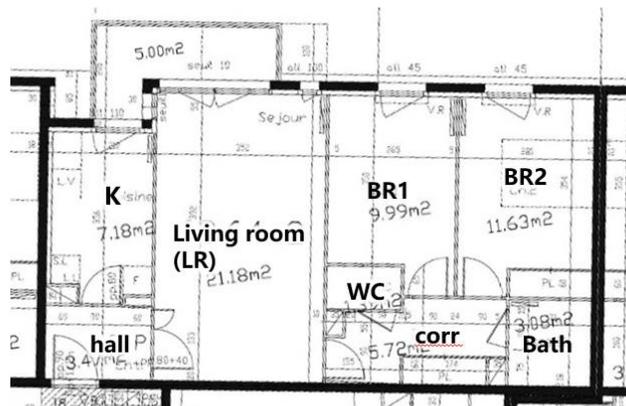
- [78] D. D. Weber et R. J. Kearney, *Natural convective heat transfer through an aperture in passive solar heated buildings*. 1980, p. 19-26. Consulté le: sept. 01, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980nps..confQ..19W>
- [79] Bâtiment-Ventilation.fr, « Performance de la ventilation et du bâti », *Bâtiment-Ventilation.fr : Site Internet*. <https://www.batiment-ventilation.fr/bonnes-pratiques-retours-dexperiences/performance-de-la-ventilation-et-du-bati-227> (consulté le sept. 01, 2021).
- [80] A. Fernstrom et M. Goldblatt, « Aerobiology and Its Role in the Transmission of Infectious Diseases », *J. Pathog.*, vol. 2013, p. e493960, janv. 2013, doi: 10.1155/2013/493960.
- [81] G. Buonanno, « Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications », *Environ. Int.*, p. 10, 2020.
- [82] « Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event - Miller - 2021 - Indoor Air - Wiley Online Library ». <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ina.12751> (consulté le sept. 01, 2021).
- [83] D.-L. Liu et W. W. Nazaroff, « Particle Penetration Through Building Cracks », *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 37, n° 7, p. 565-573, juill. 2003, doi: 10.1080/02786820300927.
- [84] C. Chen et B. Zhao, « Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor », *Atmos. Environ.*, vol. 45, n° 2, p. 275-288, janv. 2011, doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.09.048.
- [85] HCSP, « Avis relatif à la réduction du risque de transmission du SARS-CoV-2 par la ventilation et à la gestion des effluents des patients COVID-19 », p. 16, mars 2020.
- [86] L. Morawska *et al.*, « Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure », *Environ. Int.*, vol. 108, p. 75-83, nov. 2017, doi: 10.1016/j.envint.2017.07.025.
- [87] L. F. Pease *et al.*, « Investigation of potential aerosol transmission and infectivity of SARS-CoV-2 through central ventilation systems », *Build. Environ.*, vol. 197, p. 107633, juin 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107633.
- [88] S. N. Rudnick et D. K. Milton, « Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration », *Indoor Air*, vol. 13, n° 3, p. 237-245, sept. 2003, doi: 10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x.
- [89] J. Laverge, X. Pattyn, et A. Janssens, « Performance assessment of residential mechanical exhaust ventilation systems dimensioned in accordance with Belgian, British, Dutch, French and ASHRAE standards », *Build. Environ.*, vol. 59, p. 177-186, janv. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.08.018.
- [90] J. Yan *et al.*, « Infectious virus in exhaled breath of symptomatic seasonal influenza cases from a college community », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 115, n° 5, p. 1081-1086, janv. 2018, doi: 10.1073/pnas.1716561115.

Annexes

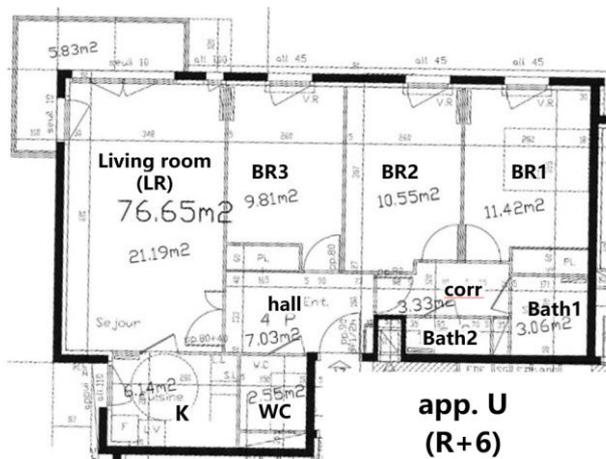
Annexe 1 : Plans des appartements voisins du logement de référence du bâtiment collectif étudié



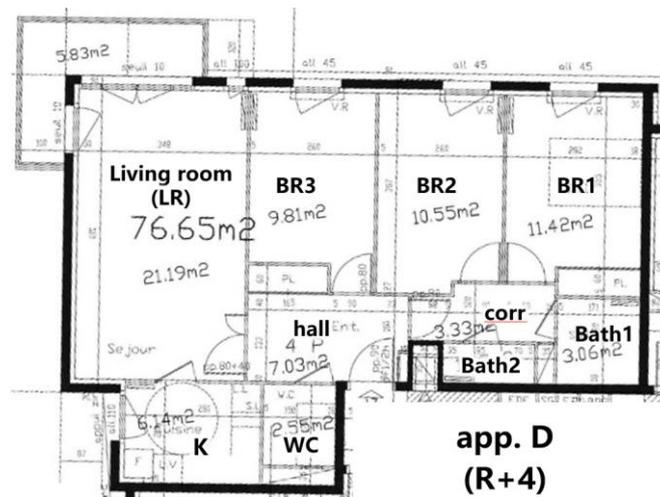
Plan de l'appartement S



Plan de l'appartement E



Plan de l'appartement U



Plan de l'appartement D

Annexe 2 : Fonctions python créant le tableau des résultats des expositions relatives et du risque d'infection des occupants pour les différents scénarios

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import os, sys
import math

## Lecture des résultats du fichiers ebw de CONTAM
def readf_ctm_expo(fpath,doublon,polname = ['Co2','Cov19','Hco','Cw','Pm25']):
    """Lecture du fichier des expositions par occupant par pas de temps au
    format ".ebw" """
    M=len(pd.read_table(fpath,skiprows=1).columns)-2 # M est le nombre
d'occupant
    oname = [str(i) for i in range(1,M)] # Liste des occupants numérotée de 1
à M (garde les doublons)
    exp = pd.read_table(fpath,skiprows=1,usecols = [c for c in
range(2,3+len(oname))])
    res = pd.DataFrame() # tableau avec en colonne les couples
polluants_occupants, en ligne le temps
    p=1
    if doublon :
        for pn in polname :
            expDt = exp[exp['ctm']==p].iloc[0:,1::2] #[1::2] car pere ,
pere_n pour éviter les doublons
            expDt.columns = [pn+'_'+z for z in oname[::2]] #[::2] idem pour
éviter les doublons
            #expDt.index =date
            res = pd.concat([res,expDt],axis = 1)
            p=p+1
    else :
        for pn in polname :
            expDt = exp[exp['ctm']==p].iloc[0:,1:]
            expDt.columns = [pn+'_'+z for z in oname[:]]
            #expDt.index =date
            res = pd.concat([res,expDt],axis = 1)
            p=p+1

```

```

    return res

## Calcul somme exposition au covid d'un occupant pour un fichier ebw

def ICov19(data) :
    """ Calcul the Cov19 indicator based on .ebw table """
    I=data.filter(regex='^Cov19',axis=1).sum(axis=0) #somme la colonne du
cov19
    I.index=[I.index[i][6:] for i in range(len(I.index))]
    return I

## Création du tableau des résultats des expositions covid de plusieurs
fichiers d'un même dossier
from os import listdir
from os.path import isfile, join, basename
import pandas as pd

def expositions_scenarios(Repertoire,doublon):
    """ Rassemble les resultats d'exposition au Covid de tous les fichiers
ebw d'un dossier
    Repertoire correspond au dossier contenant les fichiers .ebw"""
    df = pd.DataFrame()
    fichiers = [f for f in listdir(Repertoire) if f.endswith(".ebw")] # liste
des titres des fichiers ebw du Repertoire
    chemins=[]
    for f in fichiers :
        chemins = chemins + [os.path.join(Repertoire,f)] #liste des chemins
des fichiers ebw
    polname=['Co2','Cov19','H2o','Cw','Pm25']
    for fpath in chemins :
        df[basename(fpath)[15:-4]] =
ICov19(readf_ctm_expo(fpath,doublon,polname)) #Créer un tableau avec en
colonne les titres des fichiers CONTAM et en ligne les occupants
    return df

## Création du tableau des resultats relatifs

def expositions_relatifs(Tableau):
    """ Calcul l'exposition relatif par rapport au dernier scénario"""
    df = pd.DataFrame()
    cas_base = Tableau.iloc[:,-1]
    for i in range(Tableau.shape[1]): # Parcourir les colonnes
        df.loc[:,Tableau.columns[i]]=(Tableau.iloc[:,i]-
cas_base)*100/cas_base
    return df

## Calcul du coefficient mu et de la probabilité d'infection P, entre T1 et
T2 pour un fichier ebw

def CCov19(data,T1,T2) :
    """ Calcul l'exposition cumulée au Cov19 en quanta/m3 depuis la table
.ebw """
    N1, N2 = T1*5, T2*5
    I=data.filter(regex='^Cov19',axis=1)
    C=I.filter(items=[i for i in range(N1,N2)],axis=0).sum(axis=0)
    C.index=[C.index[i][6:] for i in range(len(C.index))]
    roair=1.204
    dt=1/6

```

```

p=0.48
mu=p*C*(155)*roair*dt # conversion quanta
return mu

def PCov19(data,T1,T2):
    mu=CCov19(data,T1,T2)
    P=[1-math.exp(-mu[i]) for i in range(len(mu))]
    Proba=pd.DataFrame(P)
    Proba.index=[str(i) for i in range(1,len(Proba.index)+1)]
    #Proba.columns=['P']
    return Proba

## Création du tableau des résultats avec plusieurs scenarios
from os import listdir
from os.path import isfile, join, basename
import pandas as pd

def Wells_Riley_scenarios(Repertoire,doublon,T1,T2):
    """ Rassemble les resultats d'exposition au Covid de tous les fichiers
    ebw d'un dossier
    Repertoire correspond au dossier contenant les fichiers ebw"""
    df = pd.DataFrame()
    fichiers = [f for f in listdir(Repertoire) if f.endswith(".ebw")] # liste
des titres des fichiers ebw du Repertoire
    chemins=[]
    for f in fichiers :
        chemins = chemins + [os.path.join(Repertoire,f)] #liste des chemins
des fichiers ebw
    polname=['Co2','Cov19','H2o','Cw','Pm25']
    for fpath in chemins :
        df[basename(fpath)[15:-4]] =
PCov19(readf_ctm_expo(fpath,doublon,polname),T1,T2)[0] #Créer un tableau
avec en colonne les titres des fichiers CONTAM et en ligne les occupants
    return df

## Selection des lignes avec occupants interessants

def suppression_occupants(df,numero_occupants):
    df.drop([str(i) for i in numero_occupants],0,inplace=True)

```

Annexe 3 : Fonctions python créant le tableau des résultats des débits d'air pour les différents scénarios

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import os, sys
from os import listdir
from os.path import isfile, join, basename

def readf_ctm_LinkFlow(fpath,nom, list_link) :
    """ fonction qui lit les résultats des flux d'air d'un fichier ".lfr"
    généré à partir des résultats d'une simulation CONTAMexploitée avec
    l'application simread """
    lf = pd.read_table(fpath,parse_dates = [[0,1]])
    lf.index = lf['Date_Time']

```

```

#nbl= len(list_link)
res = pd.DataFrame()
for l in list_link:
    lfdt = lf[lf['Link']==1].iloc[:,3]
    res = pd.concat([res,lfdt],axis=1)

res.columns = [nom[i] for i in range(len(list_link))] #Renome les colonne
L_xx
return res

def Flow_result(data) :
    """ Calcul des débits d'air cumulée à partir des fichiers ".lfr" """
    I=data.sum(axis=0) #somme les colonnes
    return I

def flow_scenarios(Repertoire,nom,listes_link_scenarios):
    """ Rassemble les resultats des dflux d'air de tous les fichiers ".lfr"
d'un dossier Repertoire """
    df = pd.DataFrame()
    fichiers = [f for f in listdir(Repertoire) if f.endswith(".lfr")] # liste
des titres des fichiers lfr du Repertoire
    chemins=[]
    for f in fichiers :
        chemins = chemins + [os.path.join(Repertoire,f)] #liste des chemins
des fichiers lfr
    #list_link=[52,61,82,87,63,76,6,81,0]
    i=0
    for fpath in chemins :
        df[basename(fpath)[15:-4]] =
Flow_result(readf_ctm_LinkFlow(fpath,nom,listes_link_scenarios[i])) #Créer
un tableau avec en colonne les titres des fichiers CONTAM et en ligne les
occupants
        i=i+1
    return df

```