

RAPPORT TECHNIQUE
n° dh-20-21_rt-04-v02

adressé à

Buffet Crampon
5 rue Maurice Berteaux
78 711 Mantes-la-Ville

Lot 4 : Suivi de contaminants dans des salles closes

(Référence client : Commande n°PO-028060-1)

25 mai 2021

Rédigé par : T. Soubrié, J. Néchab
Vérifié par : J. Néchab
Approuvé par : T. Soubrié

Historique

Version	Date	Modifications
dh-20-21_rt-04-v01	29 Avril 2021	Création du rapport
dh-20-21_rt-04-v02	25 mai 2021	Mises à jour

Table des matières

Historique	2
1 Présentation de l'étude	4
2 Eléments d'analyse du risque de contamination	5
2.1 Le CO_2	5
2.2 Le risque de transmission du COVID-19 par voie aéroportée	5
2.3 La contribution des dégagements de chaleur corporelle aux mouvements d'air	6
3 Analyse dans une petite salle non ventilée	7
3.1 Méthode d'analyse	7
3.2 Géométrie	7
3.3 Mise en données	7
3.3.1 Paramétrage de la thermique	7
3.3.2 Paramétrage du suivi de contaminant	8
3.4 Résultats	9
3.4.1 Profils de température	9
3.4.2 Diffusion du contaminant CO_2	10
4 Analyse dans une grande salle	13
4.1 Géométrie	13
4.2 Mise en données	13
4.2.1 Paramétrage de la ventilation	13
4.2.2 Paramétrage des débits expirés	14
4.2.3 Paramétrage de la thermique	15
4.3 Indicateurs d'analyse	17
4.3.1 Renouvellement d'air	17
4.3.2 Risque de contamination au COVID-19	17
4.4 Résultats pour la configuration "ventilation latérale"	18
4.4.1 Renouvellement d'air	18
4.4.2 CO_2	23
4.4.3 Risque de contamination au COVID-19	25
4.5 Résultats pour la configuration "ventilation plafond"	30
4.5.1 Renouvellement d'air	30
4.5.2 CO_2	34
4.5.3 Risque de contamination au COVID-19	36
4.6 Conclusion	40

1 Présentation de l'étude

Le but de cette étude est de simuler la propagation de contaminants émis lors de la respiration humaine dans des salles closes, dans un contexte de pratique musicale. On s'intéresse à deux salles classiquement rencontrées dans les établissements d'enseignement musical :

- une petite salle non ventilée ;
- une grande salle de répétition avec un système de ventilation.

Dans le cas de la salle non ventilée, le contaminant utilisé dans les calculs est le dioxyde de carbone CO_2 . Les deux espèces considérées dans les calculs sont donc l'air d'une part et le CO_2 d'autre part. Dans le cas de la salle ventilée, on utilise en premier lieu un indicateur fourni par la simulation, le LMA, pour analyser le renouvellement d'air local et donc le risque de sur-concentration en contaminants. Le CO_2 est également utilisé, comme pour la petite salle. Enfin, sur la base de la théorie du quanta infectieux, un risque de contamination au COVID-19 est évalué.

Le logiciel utilisé pour les simulations numériques est *FloEFD*, édité par *Siemens*.

2 Éléments d'analyse du risque de contamination

2.1 Le CO_2

Le dioxyde de carbone CO_2 est présent dans l'atmosphère avec un taux actuel de l'ordre de 400 ppm (parties par million) [1]. Dans l'air expiré par l'homme, la concentration en CO_2 est 100 fois supérieure, soit 40 000 ppm. À partir d'une certaine concentration dans l'air, ce gaz s'avère dangereux voire mortel. La valeur limite d'exposition est de 30 000 ppm sur une durée de 15 minutes. Les valeurs limites réglementaires ou normatives actuelles varient usuellement entre 1000 et 1500 ppm (données Anses).

La concentration en CO_2 peut donc être utilisée comme un indicateur d'une contamination de l'air intérieur par la respiration humaine. C'est l'un des critères qui fondent la réglementation en matière d'aération des locaux.

Sa propagation n'est pas arrêtée par les masques ou un instrument de musique, contrairement à une partie des gouttelettes et aérosols. Il est important de noter qu'il n'y a donc pas de lien direct entre la concentration en CO_2 et le risque de contamination au COVID-19 par voie aéroportée, dans le cadre de l'usage de moyens de protection individuels. Malgré cela, dans son rapport *Covid-19 : aération, ventilation et mesure du CO_2 dans les ERP* (établissements recevant du public), le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP) indique qu'une "concentration en CO_2 supérieure à un seuil de 800 ppm doit conduire dans tous les cas à ne pas occuper la salle et à agir en termes d'aération/renouvellement d'air et/ou de réduction du nombre de personnes admises dans les locaux d'un ERP". Par contre, la concentration de CO_2 est un bon indicateur pour évaluer l'efficacité d'un renouvellement d'air entre deux périodes d'occupation (par ouverture des portes et fenêtres par exemple), en suivant le retour de ce taux à la normale atmosphérique.

Le tableau 2.1 donne la correspondance entre les concentrations exprimées en ppm, et pourcentage volumique et en pourcentage massique. Dans la suite, on utilisera l'une ou l'autre de ces unités, selon leur disponibilité dans les données de sortie du logiciel de simulation.

	ppm	% volume	% masse
Atmosphère	400	0,04%	0,06%
Crièrre HCSP	800	0,08%	0,12%
Air expiré	40 000	4%	6%

TABLEAU 2.1 : Concentration de CO_2 dans l'atmosphère et l'air expiré, exprimée en parties par million (ppm), en fraction volumique (%) et en fraction massique (%)

2.2 Le risque de transmission du COVID-19 par voie aéroportée

On suit ici la méthodologie utilisée par Stockman *et al.* [2] dans le contexte de la pratique musicale. Elle utilise l'équation de Wells-Riley, elle-même basée la notion de taux d'émission de quanta q . Les quanta représentent la dose infectieuse d'aérosols respiratoires lorsque la dose virale provoquant l'infection n'est pas connue, comme c'est encore le cas pour le SARS-COV-2. Selon l'analyse de Dai et Zhao [3], des valeurs de q dans la plage $14\text{--}48\text{ h}^{-1}$ peuvent être considérées dans le cadre d'une activité faible à modérée, incluant les cas asymptomatiques. La borne maximale de cette plage a été retenue dans l'analyse de Stockman *et al.* [2].

La probabilité P d'infection au COVID-19 par voie aéroportée s'exprime alors comme :

$$P = 1 - e^{-pNt} \quad (2.1)$$

avec p le débit d'inspiration des personnes susceptibles d'être contaminées (typiquement 8 L min^{-1}),

N la concentration de quanta (quanta/m^3) et t le temps total d'exposition à un air contenant les aérosols infectieux.

2.3 La contribution des dégagements de chaleur corporelle aux mouvements d'air

Le métabolisme humain, c'est-à-dire l'énergie dissipée par le corps, dépend de l'activité. La norme ISO 8996 établit par exemple différentes classes de métabolismes en fonction du type d'activité professionnelle, allant du niveau 0 - "Repos" 115 W - au niveau 4 - "Métabolisme très élevé" 520 W.

Pour la pratique musicale, on peut considérer la classe 1 "Métabolisme faible", correspondant à une puissance de 180 W.

Les modes de dissipation de cette puissance sont au nombre de quatre :

- la **conduction** : elle est souvent négligée du fait des faibles surface d'échange (la plante des pieds pour une personne debout, l'échange étant encore limité par les chaussures qui constituent une barrière thermique) ;
- la **convection** : elle s'exprime comme $hS(T_s - T_{air})$ où h est le coefficient de transfert de chaleur, S la surface du corps, T_s la température de surface et T_{air} la température de l'air. Du fait des vêtements, la température de surface T_s est inférieure à celle du corps. La différence de température avec l'air génère un flux de convection naturelle, conduisant à un coefficient d'échange h minimal de l'ordre de $2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Avec $S = 1.8 \text{ m}^2$, $T_s = 30^\circ\text{C}$ et $T_{air} = 20^\circ\text{C}$, la puissance convective est de 35 W, soit 20% du "métabolisme faible". La présence de ventilation mécanique, ou de vent en extérieur, augmente le coefficient de transfert convectif et donc la puissance échangée par ce mode ;
- le **rayonnement thermique** : l'efficacité des échanges radiatifs dépend de la différence de température entre la surface du corps/des vêtements, et les objets environnants, typiquement les murs de la pièce. Plus précisément, les échanges radiatifs sont proportionnels à l'écart des puissances quatrièmes de ces températures. Dans une pièce à 20°C , pour une émissivité de 0.9, la puissance échangée par rayonnement est d'environ 100 W, soit 55% du métabolisme ;
- l'**évaporation** : pour l'exemple pris jusqu'à présent, ce mode de transfert de puissance correspondrait aux 25% du métabolisme restant. C'est le seul mode disponible lorsque les écarts de température entre la surface du corps et l'environnement se réduisent. Autrement dit, plus la température de l'air et des parois environnantes augmente, plus l'on transpire pour évacuer la chaleur produite par le métabolisme.

Lorsque les conditions le permettent (typiquement en hiver), la puissance thermique transmise à l'air et aux parois est évacuée vers l'extérieur ou les pièces voisines par conduction dans les murs. Lorsque les conditions ne le permettent pas (pièce isolée, période estivale), la température de l'air dans la pièce augmente nécessairement.

3 Analyse dans une petite salle non ventilée

On s'intéresse ici à une salle de 12 m^2 , avec une hauteur sous plafond de 3 m , occupée par 4 personnes, sans ventilation.

3.1 Méthode d'analyse

Dans un espace non ventilé soumis à l'émission de contaminants, il n'existe pas d'état stabilisé en concentration. Cette dernière augmente avec le temps, en fonction du taux d'émission.

Dans ce contexte, l'analyse réalisée ici consiste dans un premier temps à calculer l'écoulement d'air résultant des mouvements de convection naturelle générés par le dégagement de chaleur corporelle. Dans un second temps, on calcule l'évolution temporelle de concentration en CO_2 résultant de la diffusion de ce gaz dans l'air.

Pour un volume de la pièce de 36 m^3 et un débit d'air expiré de 8 L min^{-1} par personne, la teneur en CO_2 augmente en moyenne de 36 ppm/min . Le critère de 800 ppm édicté par le HCSP (voir § 2.1) devrait donc être atteint au bout de 11 min .

3.2 Géométrie

Quatre personnes sont disposées dans la salle de 12 m^2 (3 m par 4 m), comme on le voit sur les figures 3.1 et 3.2.

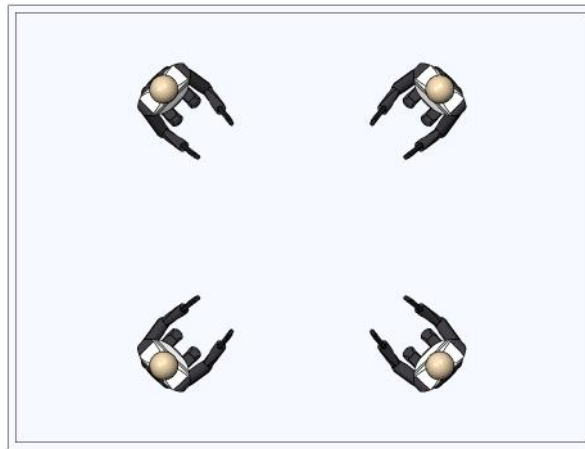


FIGURE 3.1 : Disposition des personnes dans la petite salle - vue de dessus

3.3 Mise en données

La simulation de la diffusion du CO_2 dans la petite salle se décompose en deux calculs successifs :

1. Calcul stationnaire, c'est-à-dire en régime permanent, des mouvements d'air dus à la gravité et au dégagement de chaleur corporelle.
2. Calcul instationnaire, donc dépendant du temps, de la diffusion du CO_2 émis par les personnes, en s'appuyant sur les résultats du premier calcul.

3.3.1 Paramétrage de la thermique

Le paramétrage de la thermique pour le calcul stationnaire est le suivant :

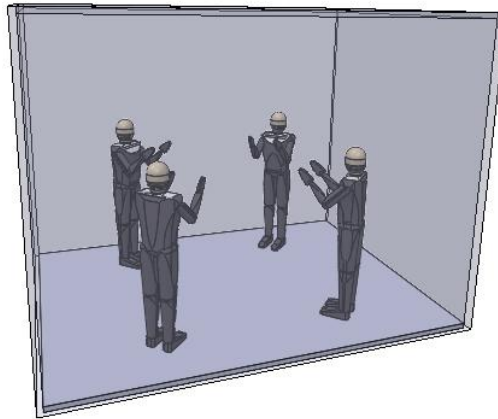


FIGURE 3.2 : Disposition des personnes dans la petite salle - vue isométrique

- les murs sont adiabatiques ;
- chaque personne est une source de chaleur de 35 W, dont 30 W au niveau du corps et 5 W au niveau de la tête (soit 140 W pour les 4 personnes) ;
- une dissipation de chaleur uniforme de 140 W est établie dans tout le domaine.

Ce dernier point permet d'éviter une élévation infinie en température de la salle, sans prendre en compte les échanges thermiques avec l'extérieur.

3.3.2 Paramétrage du suivi de contaminant

Pour le suivi de contaminant CO_2 instationnaire, le paramétrage est le suivant :

- on observe la diffusion du contaminant sur une durée de 60 min ;
- le pas de temps de résolution est de 60 s ;
- le CO_2 est émis depuis la bouche des personnes (voir figure 3.3) ;
- les personnes expirent uniquement du CO_2 ;
- le débit massique de contaminant émis par chaque personne est de 3.9 mg s^{-1} , ce qui correspond à la quantité de CO_2 expirée pour un débit d'air de 8 L min^{-1} avec une teneur en CO_2 de 4% en volume ;
- la teneur en CO_2 initiale dans l'air est de 0.04 % en volume.

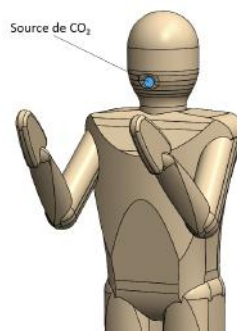


FIGURE 3.3 : Source d'émission du CO_2

3.4 Résultats

3.4.1 Profils de température

La figure 3.5 montre la mise en place naturelle de la stratification en température, avec de l'air chaud en partie haute de la pièce et de l'air plus frais au niveau du sol. On voit sur la figure 3.6 que des panaches d'air chaud se forment autour des personnes et au-dessus de leur tête.

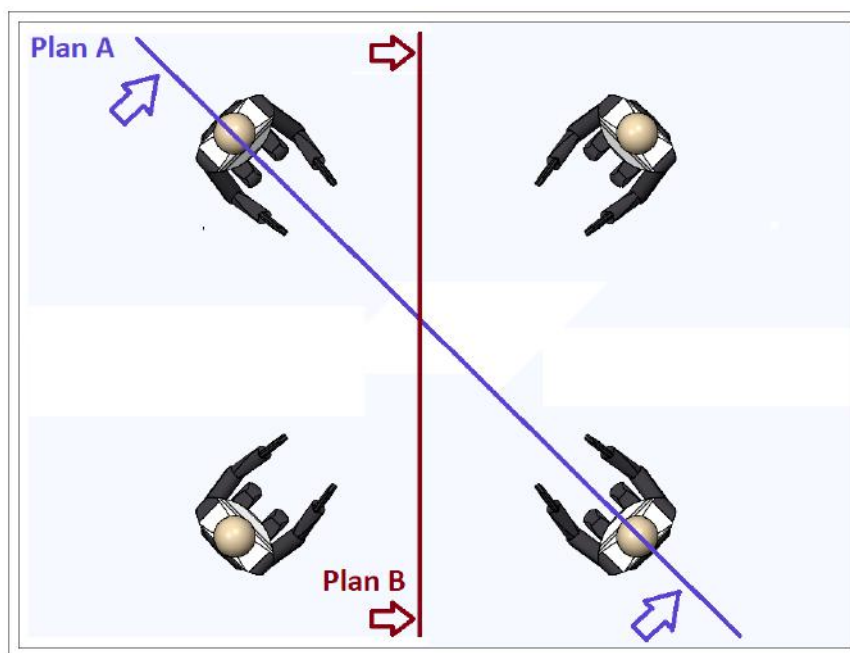


FIGURE 3.4 : Plans de coupes utilisés

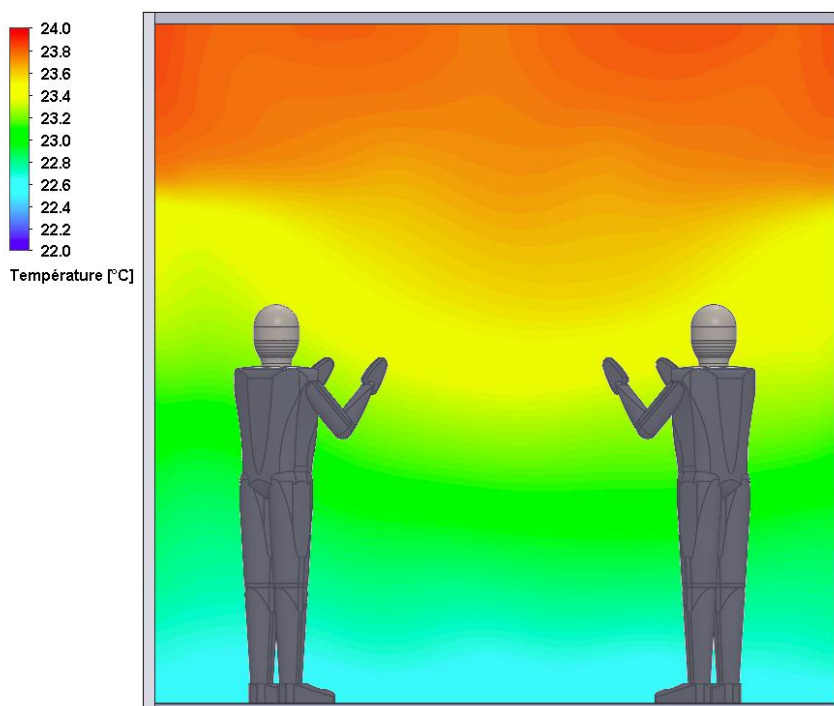


FIGURE 3.5 : Profil de température dans le plan B

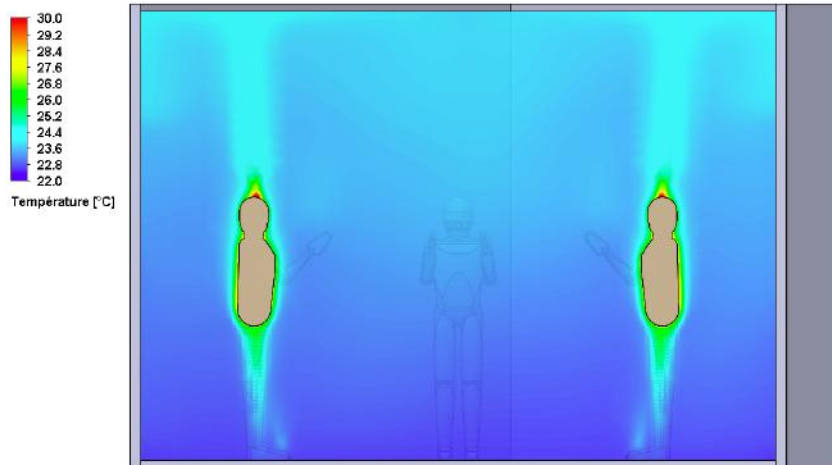


FIGURE 3.6 : Profil de température dans le plan A

3.4.2 Diffusion du contaminant CO_2

Le CO_2 se diffuse globalement de manière uniforme à tout instant. Les niveaux moyens de concentration de CO_2 dans l'air (voir figures 3.7 à 3.10) sont de :

- $0.09\% \pm 0.01$ en masse (600 ppm) au bout de 5 min
- $0.11\% \pm 0.01$ en masse (750 ppm) au bout de 10 min
- $0.23\% \pm 0.01$ en masse (1550 ppm) au bout de 30 min
- $0.38\% \pm 0.01$ en masse (2550 ppm) au bout de 60 min

Avant 5 min, on voit sur la figure 3.7 que les zones de forte concentration se limitent au voisinage proche de la tête des personnes. Entre 5 min et 10 min, la zone de forte concentration redescend vers le sol par le centre (figure 3.8). A 10 min, la concentration de CO_2 atteint localement le critère du HCSP de 0.12%. Après 10 min (figures 3.9 et 3.10), les concentrations de CO_2 sont uniformément supérieures à ce critère.

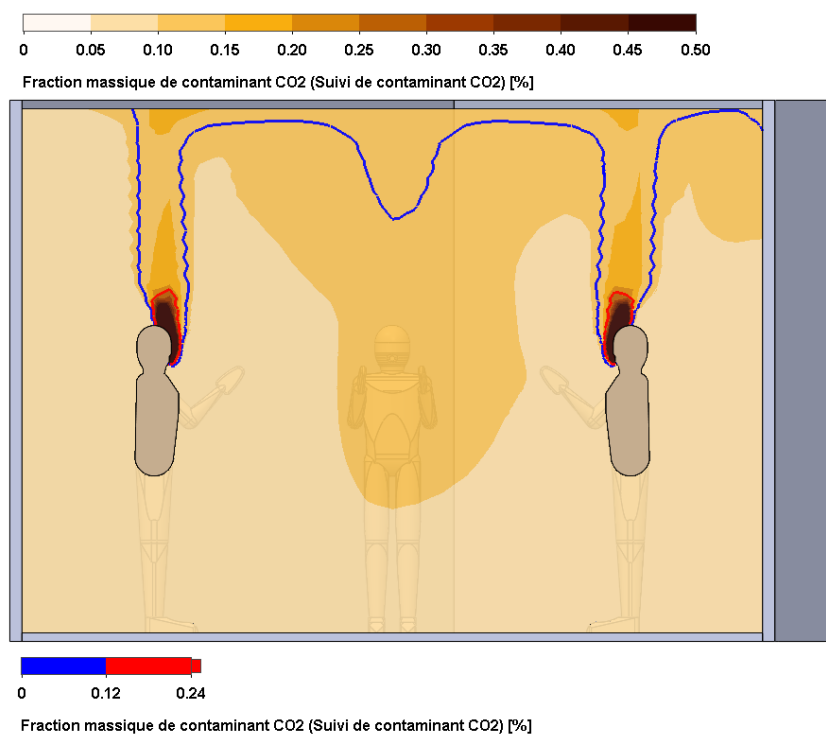


FIGURE 3.7 : Concentration massique de l'air en CO_2 au bout de 5 min, avec isoligne 0.12 % en bleu (critère HSCP) et 0.24 % en rouge, dans le plan A

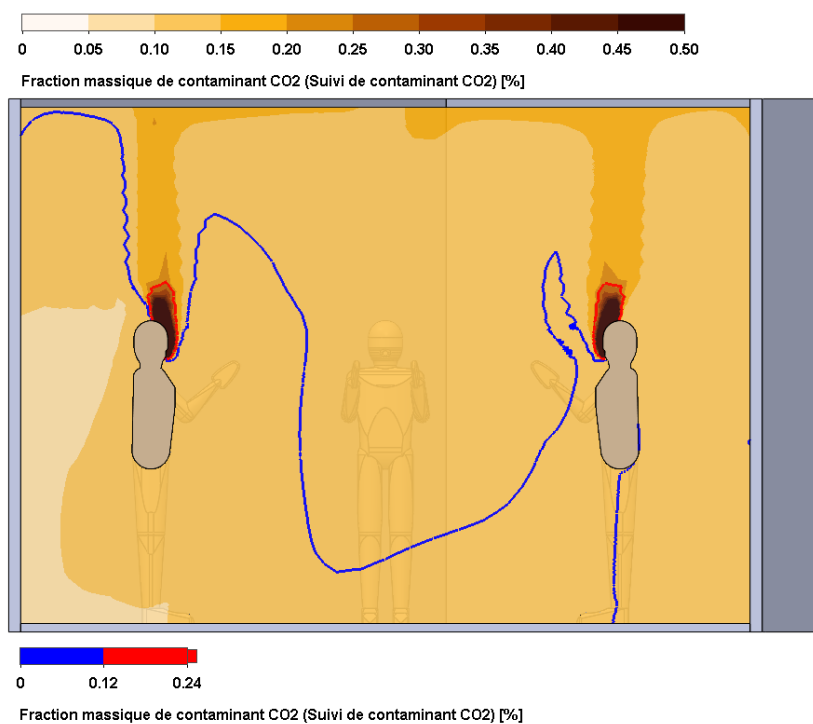


FIGURE 3.8 : Concentration massique de CO_2 au bout de 10 min, avec isoligne 0.12 % en bleu (critère HSCP) et 0.24 % en rouge, dans le plan A

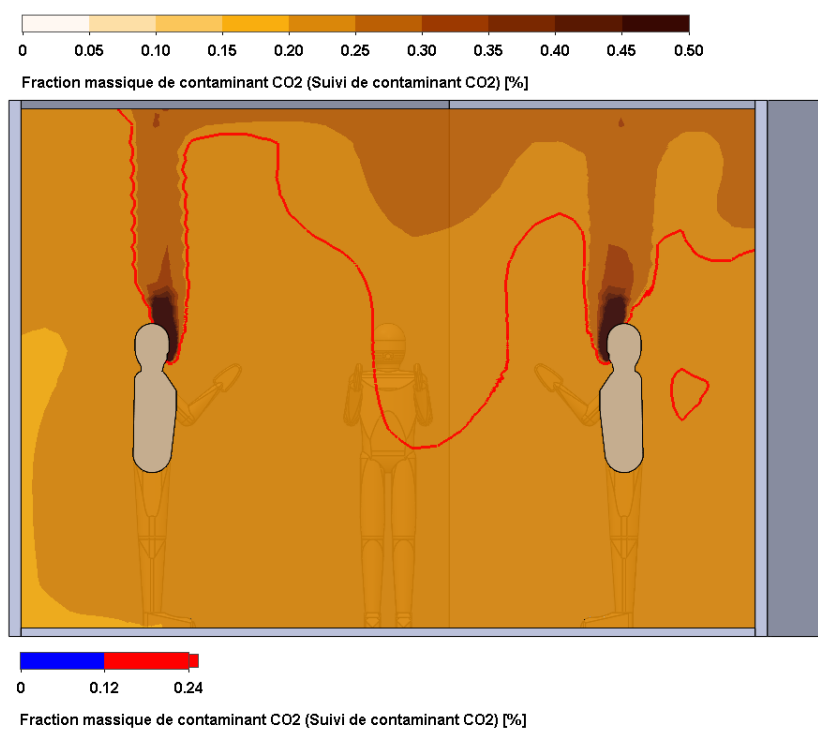


FIGURE 3.9 : Concentration massique de CO_2 au bout de 30 min, avec isoligne 0.12 % en bleu (critère HSCP) et 0.24 % en rouge, dans le plan A

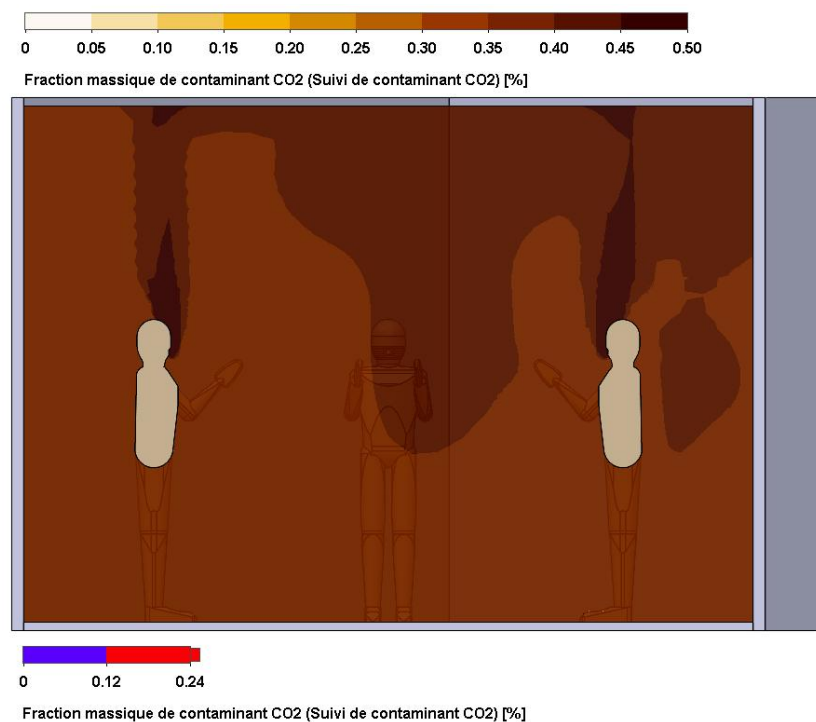


FIGURE 3.10 : Concentration massique de CO_2 au bout de 60 min, avec isoligne 0.12 % en bleu (critère HSCP) et 0.24 % en rouge, dans le plan A

4 Analyse dans une grande salle

4.1 Géométrie

Suite à une enquête auprès de conservatoires menée par le consortium dans le cadre du projet PIC-PIV, il a été décidé d'étudier une salle ayant les caractéristiques suivantes :

- surface d'environ 80 m^2 ,
- 1 personne pour 3 m^2 , soit 26 personnes,
- taux de renouvellement d'air de $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ par personne.

Des renseignements complémentaires demandés sur la ventilation de telles salles ont permis d'obtenir les informations suivantes :

- cas de salles ventilées par un soufflage via des grilles installées sur un mur latéral, repris sur le mur opposé par des grilles à hauteur plus élevée ⁱ,
- cas de salles avec grilles de soufflage et de reprise au plafond ⁱⁱ.

Sur cette base d'information, deux configurations de salle ont été considérées. Elles partagent une même surface au sol, de $11 \times 8 \text{ m}^2$. Elles diffèrent par la hauteur au sol et le système de soufflage.

La configuration dite "Ventilation latérale" (figure 4.1a) a les caractéristiques suivantes :

- Hauteur sous plafond : 5.5 m
- Soufflage par 3 grilles $20 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$ sur mur latéral, à 2.9 m du sol,
- Extraction par 2 grilles $32 \text{ cm} \times 114 \text{ cm}$ sur mur latéral opposé, à 5 m du sol.

La configuration dite "Ventilation plafond" (figure 4.1b) a les caractéristiques suivantes :

- Hauteur sous plafond : 3.5 m
- Soufflage par 4 grilles $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ au centre du plafond,
- Extraction par 4 grilles $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ au plafond, sur les côtés.

La salle est occupée par 25 musiciens, répartis sur 5 rangées (figure 4.2) :

- Rangée 1 : chef d'orchestre
- Rangée 2 : 4 violons I, 2 altos
- Rangée 3 : 4 violons II, 2 violoncelles
- Rangée 4 : 2 flûtes, 1 hautbois, 2 clarinettes, 1 contrebasse
- Rangée 5 : 1 perc, 1 trompette, 1 cor, 1 trombone, 2 bassons

La distance inter-rangée est de 1.5 m des rangées 1 à 3, puis 2 m des rangées 3 à 5. La distance latérale entre deux musiciens est de 1.83 m.

4.2 Mise en données

4.2.1 Paramétrage de la ventilation

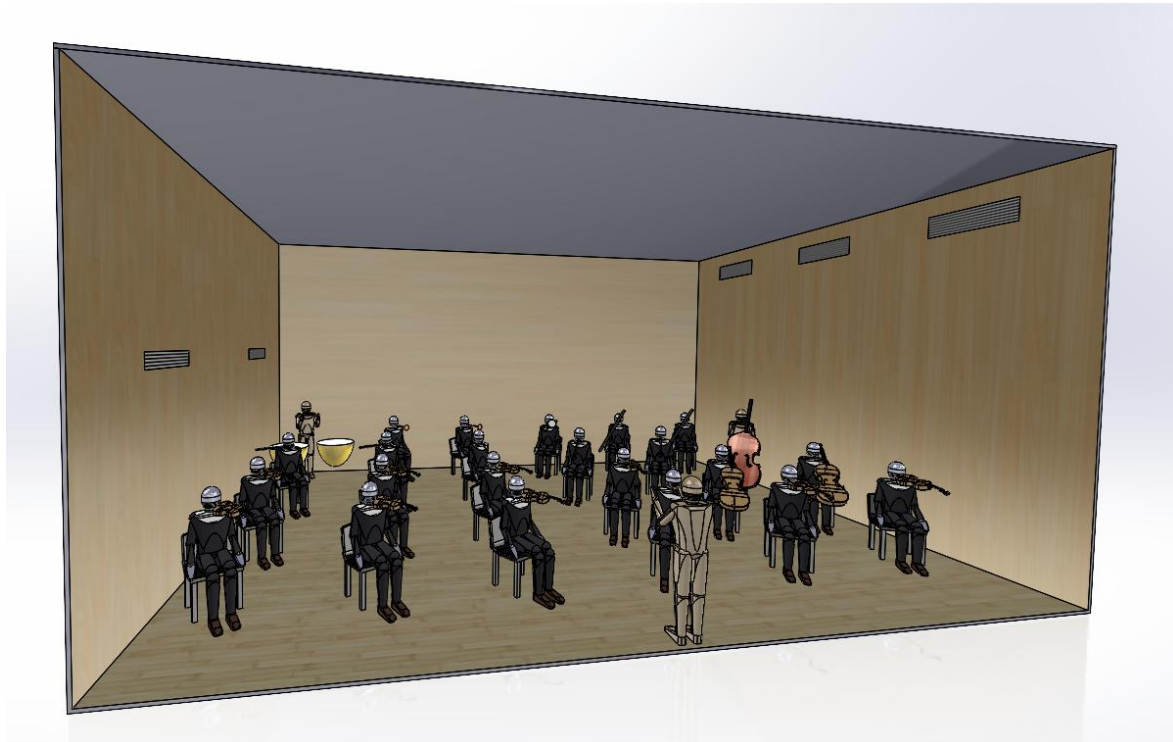
Le débit d'air ventilé est de $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ par personne, soit de $625 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ au total. Ce débit correspond à un taux de renouvellement d'air de 1.3 vol/h dans la configuration "Ventilation latérale" et 2 vol/h dans la configuration "Ventilation plafond".

La localisation des grilles de soufflage et de reprise est précisée sur la figure 4.3.

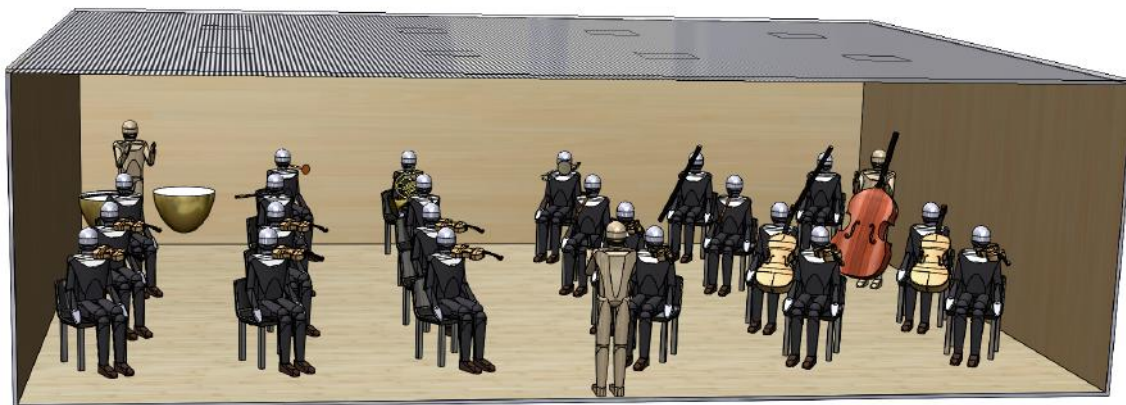
La teneur en CO_2 de l'air de ventilation est prise égale à celle dans l'atmosphère.

i. Salle Chopin au CNSMDP

ii. CRI Vibrato Océan-Marais de Monts



(a) Configuration "ventilation latérale"



(b) Configuration "ventilation plafond"

FIGURE 4.1 : Géométrie de la grande salle en fonction de la configuration

4.2.2 Paramétrage des débits expirés

On considère un gaz composé de 3 espèces :

- de l'air,
- du CO_2 ,
- une espèce additionnelle, ayant les mêmes propriétés que l'air, utilisée comme traceur pour le suivi des quanta.

On considère trois sources de quanta, repérées sur la figure 4.4 :

- la bouche du chef d'orchestre, supposé sans masque, émettant le taux nominal de 48 quanta/h ;
- la bouche d'un second violon, au second rang et près du centre de la pièce, supposé porter un masque chirurgical et émettre de ce fait un taux réduit de 50% en suivant la méthodologie de

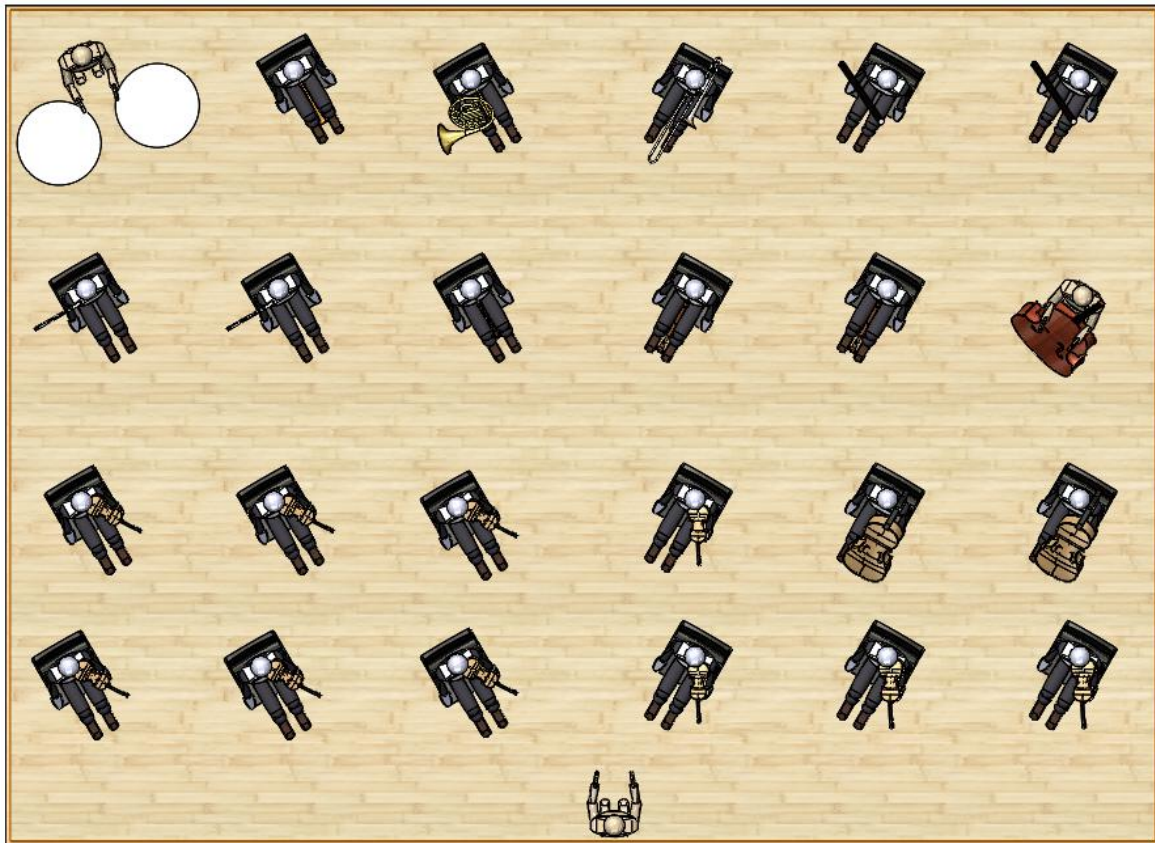


FIGURE 4.2 : Position des musiciens dans la grande salle

Dai et Zhao [3], soit 24 quanta/h ;

- le pavillon de la clarinette 1, supposé émettre le double du taux nominal, soit 96 quanta/h. On s'appuie ici sur une concentration en aérosol en sortie d'instrument mesurée au double de celle produite par la respiration [4].

Les débits et fractions massiques de chaque espèce sont paramétrés comme indiqué dans le tableau 4.1.

	Débit (L min ⁻¹)	Air	CO ₂	Quanta (h ⁻¹)
Bouche chef	8	0.94	0.06	48
Bouche 1 violon II	8	0.94	0.06	24
Bouches autres musiciens corde, percu	8	0.94	0.06	0
Bouche flûtiste, Sortie flûte, Pavillon hautbois	5	0.94	0.06	0
Pavillon clarinette 1	10	0.94	0.06	96
Pavillon autres instruments à vent	10	0.94	0.06	0

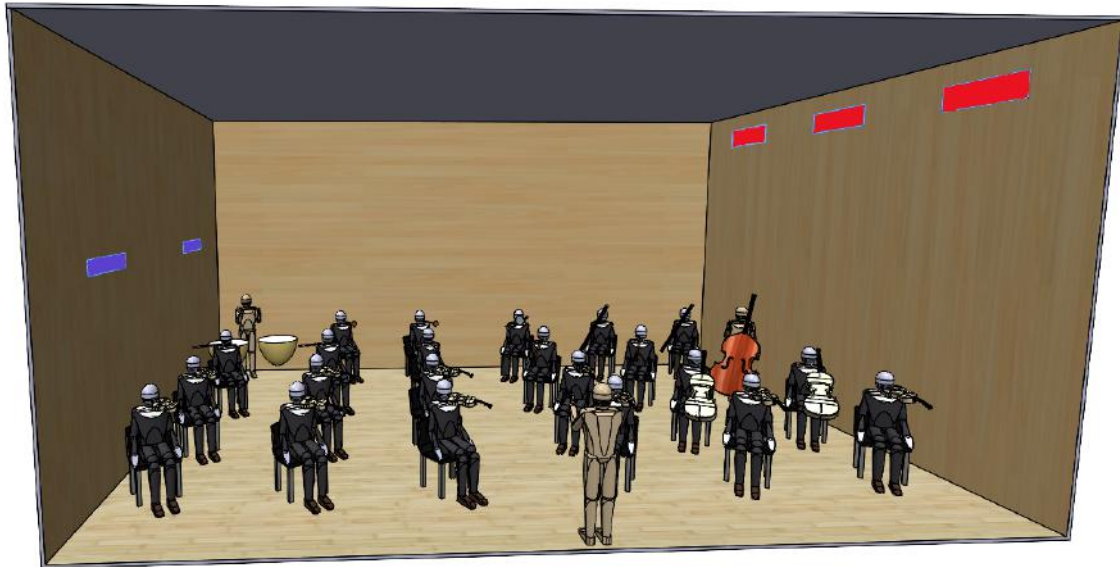
TABLEAU 4.1 : Débit, fractions massiques d'air et de CO₂, et débit de quanta au niveau des musiciens

4.2.3 Paramétrage de la thermique

L'air de ventilation est soufflé à 19 °C.

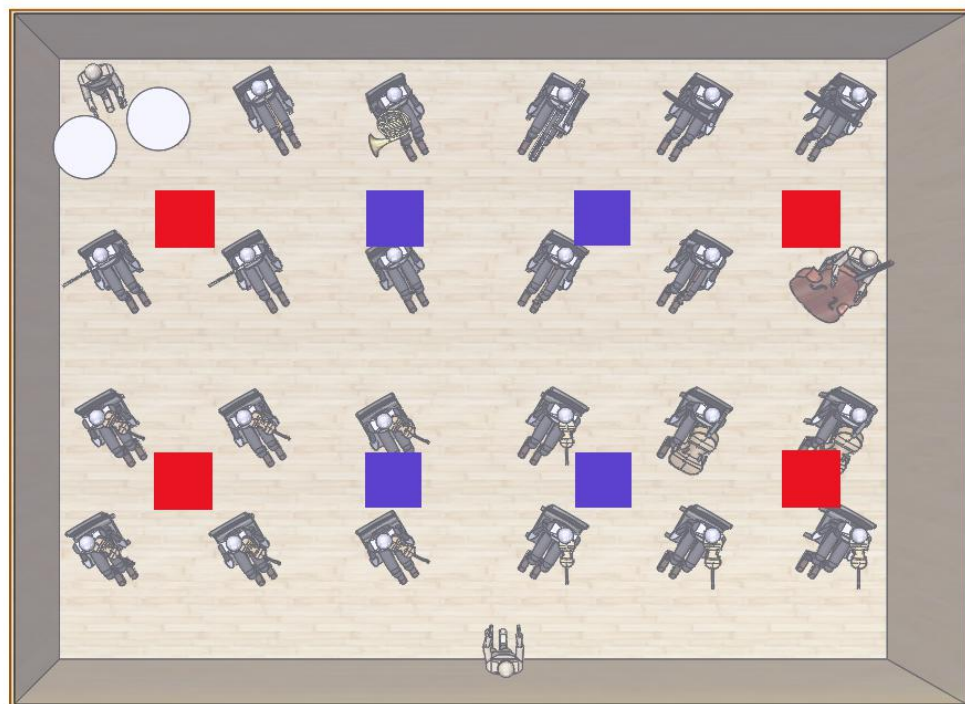
L'air en sortie de la bouche des musiciens est de 32 °C. En sortie des instruments, il est de 25 °C.

Une température de 34 °C est appliquée à la surface de la tête des musiciens, et 30 °C au niveau du



(a) Configuration "ventilation latérale"

■ Soufflage
■ Reprise



(b) Configuration "ventilation plafond"

FIGURE 4.3 : Position des grilles de soufflage et de reprise selon la configuration de salle

corps en raison des vêtements. On obtient dans les simulations des coefficients d'échange de l'ordre de $1.5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ au niveau du corps et $2.0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ au niveau de la tête, conduisant à des taux d'échange de chaleur respectifs de 15 W m^{-2} et 35 W m^{-2} , et une perte corporelle par convection de 30 W et 5 W.

Le rayonnement thermique émis par chaque musicien est supposé transmis uniformément à l'ensemble des parois et évacué par ces dernières. Une condition d'adiabaticité (flux nul) y est appliquée.

La température moyenne résultante dans la salle est de 23°C .

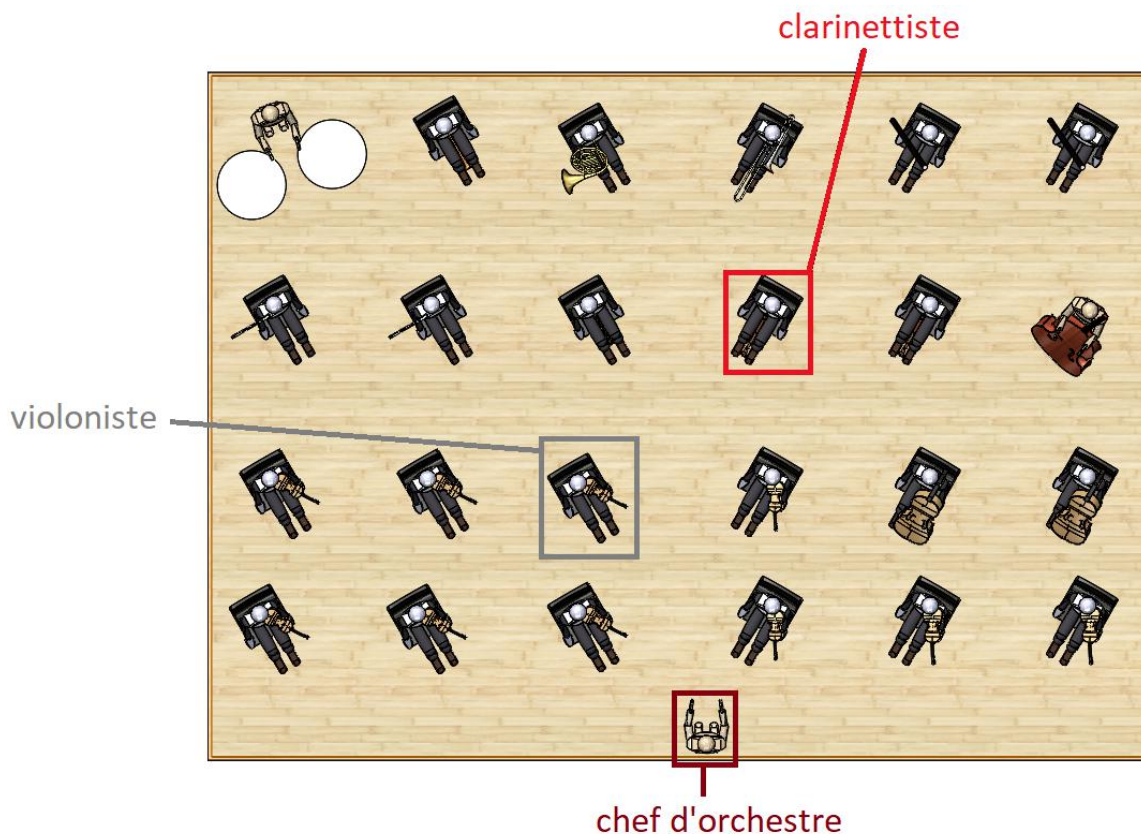


FIGURE 4.4 : Localisation des émetteurs de quanta infectieux

4.3 Indicateurs d'analyse

4.3.1 Renouvellement d'air

On utilise un indicateur appelé Local Mean Age (LMA) pour analyser la qualité du renouvellement d'air local. Ce paramètre donne une indication, en un point de la pièce, du temps moyen qu'il a fallu à une particule d'air pour atteindre ce lieu depuis qu'elle a été introduite par une grille de soufflage. Par conséquent, plus le LMA est élevé, plus l'air a été susceptible de se charger en contaminants, si les flux d'air conduisant à cette zone de fort LMA ont traversé des zones de contamination.

Étant donné le taux de renouvellement d'air global, le LMA moyen attendu est de 45 min pour la configuration "ventilation latérale", et de 30 min pour la configuration "ventilation plafond".

4.3.2 Risque de contamination au COVID-19

Pour analyser le risque d'infection, on représente la distribution de probabilité P (voir § 2.2) dans les coupes médianes de chaque émetteur, représentées sur la figure 4.5, ainsi que dans des coupes horizontales au niveau des têtes des musiciens. Les distributions dans les coupes médianes sont représentées en vue de côté, et non normal au plan de coupe.

Cette probabilité d'infection est évaluée dans les conditions suivantes :

- au bout de deux durées d'exposition : 30 min d'une part et 60 min d'autre part ;
- pour une personne exposée ne portant pas de masque ;
- pour une personne exposée ayant un débit respiration de 8 L min^{-1} .

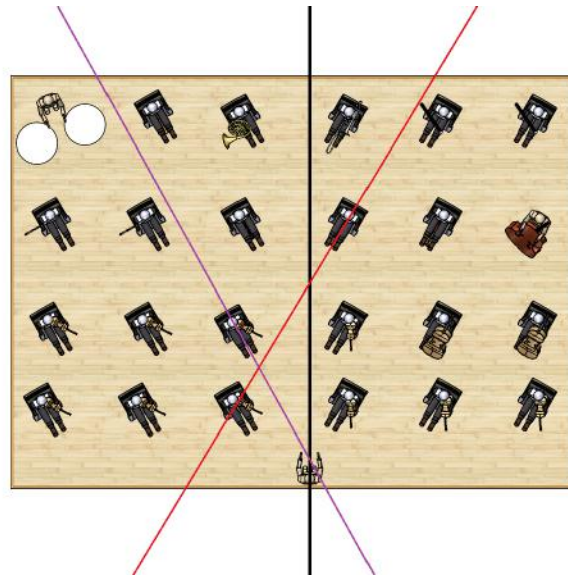


FIGURE 4.5 : Plans médians pour chaque émetteur de quanta infectieux

Pour une personne portant un masque de type chirurgical dont l'efficacité est estimée à 50% vis-à-vis du risque de contamination par voie aéroportée, la probabilité d'infection présentée ici serait atteinte au bout du double de temps. Ainsi, la probabilité présentée comme celle après 30 min (respectivement 60 min) pour une personne sans masque correspond à celle après 60 min (respectivement 120 min) pour une personne masquée.

4.4 Résultats pour la configuration "ventilation latérale"

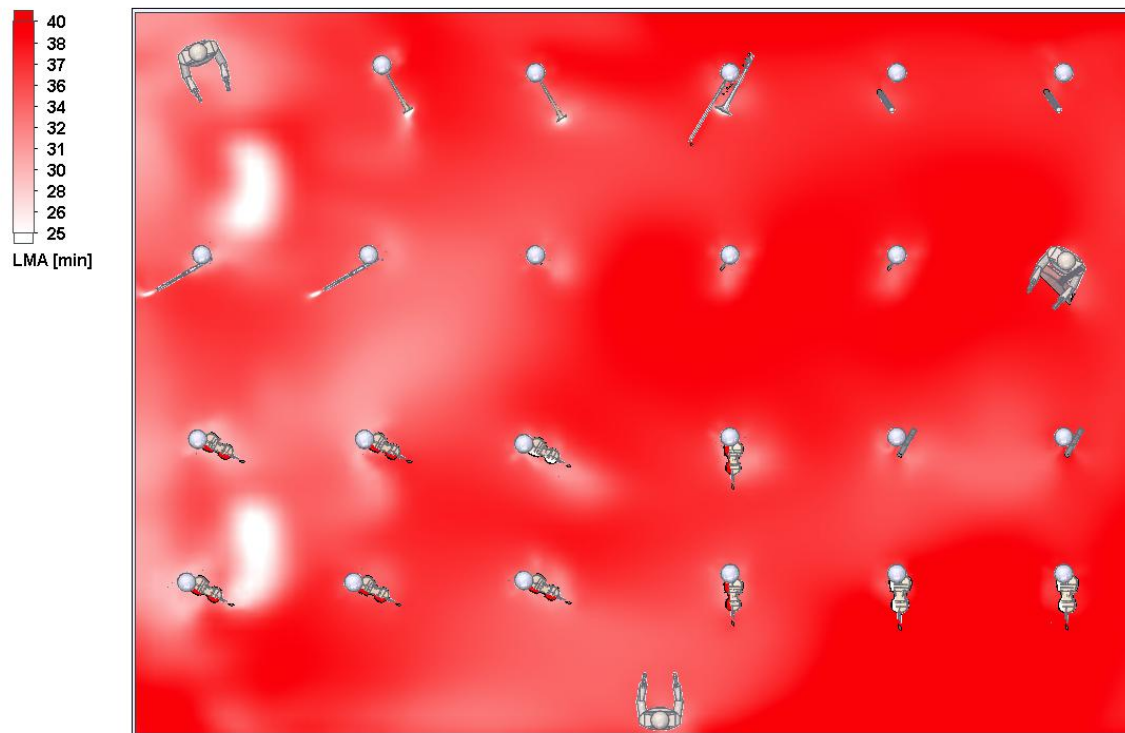
4.4.1 Renouvellement d'air

Le LMA est relativement homogène au niveau des visages des musiciens, qu'ils soient en position assise ou debout (figure 4.6), avec cependant un léger déséquilibre gauche/droite lié au fait que l'air neuf est soufflé d'un seul côté et repris de l'autre. On note des spots de valeurs faibles à proximité des grilles de soufflage, alors que ces dernières sont localisées à 2.9 m du sol. Les vues dans des coupes médianes, au centre de la pièce (figure 4.7) ou entre les deux rangées de l'harmonie (figure 4.8), indiquent une stratification verticale du LMA, avec des niveaux plus élevés en partie haute qu'en partie basse. En moyenne dans le volume, le LMA est de 39 min, proche de la valeur théorique attendueⁱⁱⁱ, avec un maximum local à 55 min soit 40% supérieur à la moyenne. La vue dans la coupe passant par une grille de soufflage (figure 4.8) montre clairement une trajectoire descendante de l'air soufflé : il se dirige vers le sol, qu'une fois atteint il longe jusqu'au mur opposé. Au-dessus des musiciens, et même dès l'assise, les lignes de flux d'air montrent des boucles de recirculation, qui favorisent le brassage.

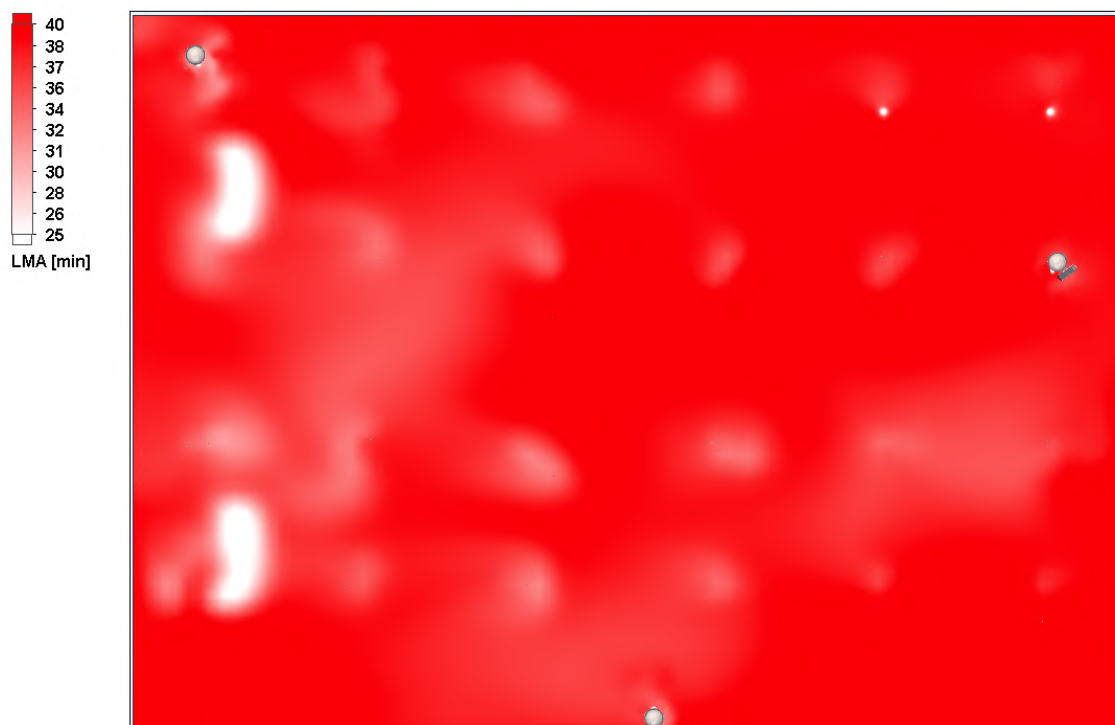
La cartographie de température dans la vue médiane (figure 4.7) montre la stratification thermique : l'air chaud s'établit en partie haute, quand l'air froid reste au sol. Le différentiel de température est de 4°C. La plus forte densité de l'air froid explique la trajectoire descendante de l'air en sortie des grilles de soufflage. La vitesse, de l'ordre de 0.5 m s^{-1} , est insuffisante pour maintenir le jet à sa hauteur initiale. A proximité du sol, on observe un différentiel de température entre la partie gauche et la partie droite de la salle, avec bien sûr un niveau plus faible à proximité du soufflage. Ce différentiel n'est pas présent au-dessus de l'assise. Le même différentiel existe pour le LMA.

Les lignes de courant représentées sur la figure 4.9 sont une autre façon de mettre en évidence la

iii. L'écart de 15% avec la valeur théorique provient de la réduction de volume due à l'encombrement, c'est-à-dire la présence des musiciens et des instruments.



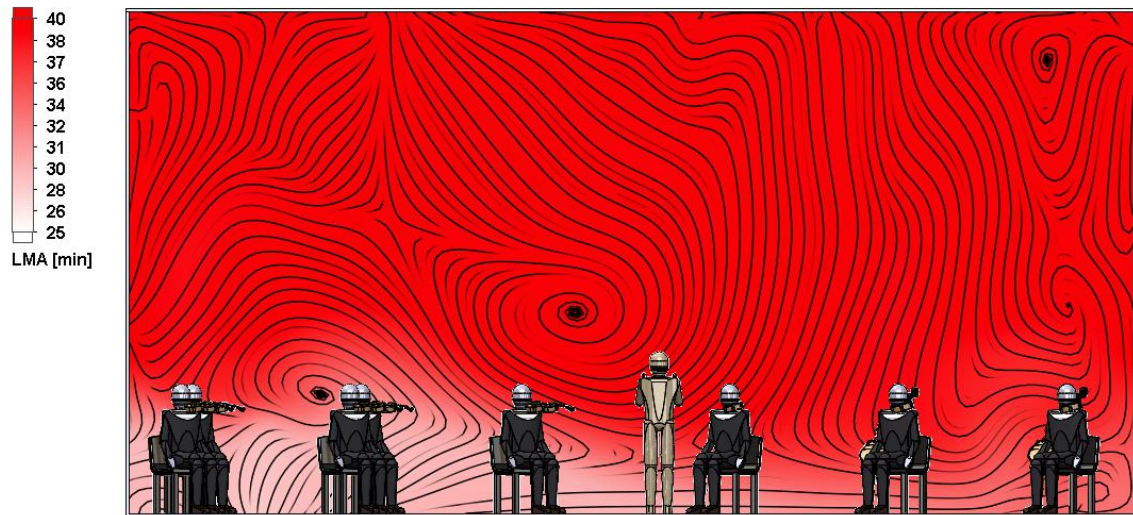
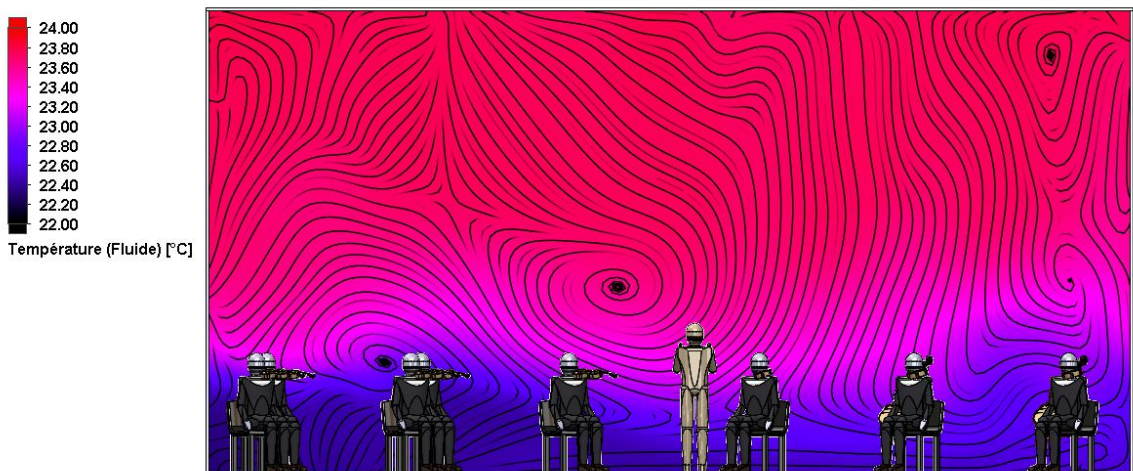
(a) À hauteur de bouche des musiciens assis

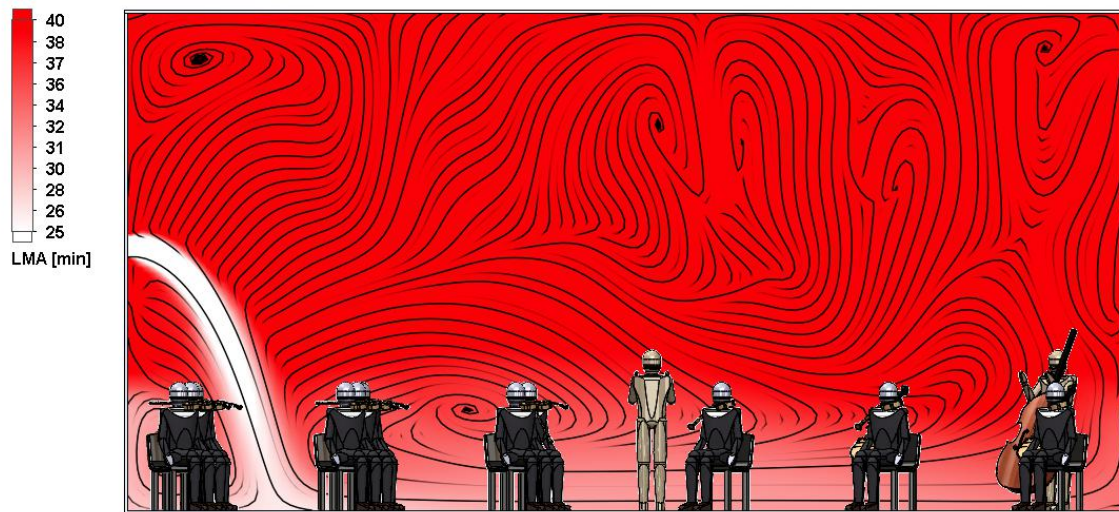


(b) À hauteur de bouche des musiciens debout

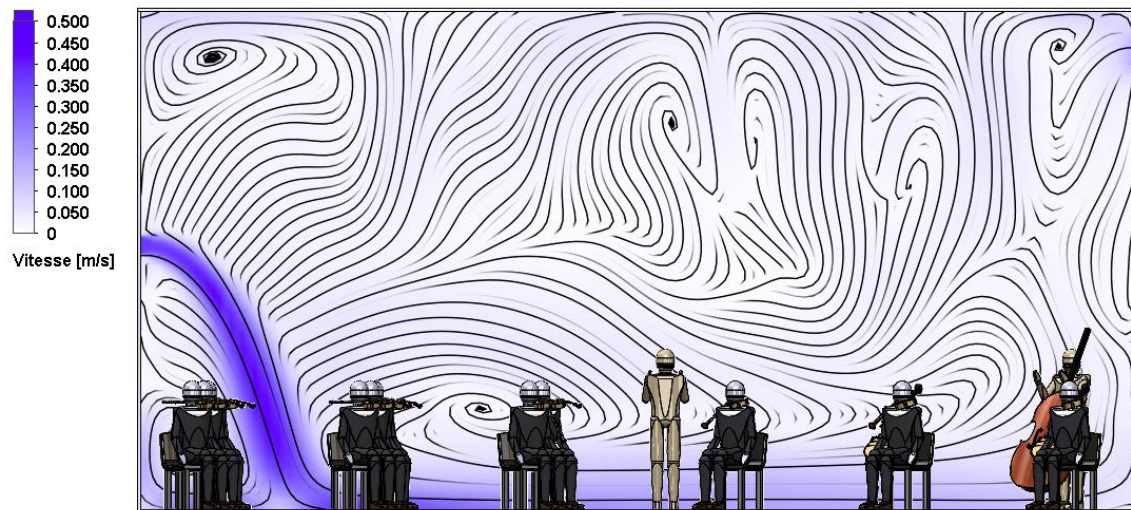
FIGURE 4.6 : LMA dans des plans de coupe horizontaux

trajectoire descendante des flux d'air en sortie des grilles.

(a) *LMA*(b) *Vitesse d'air*(c) *Température***FIGURE 4.7 : Visualisations dans une coupe médiane de la salle**



(a) LMA



(b) Vitesse d'air

FIGURE 4.8 : Visualisations dans une coupe médiane entre les rangs de l'harmonie

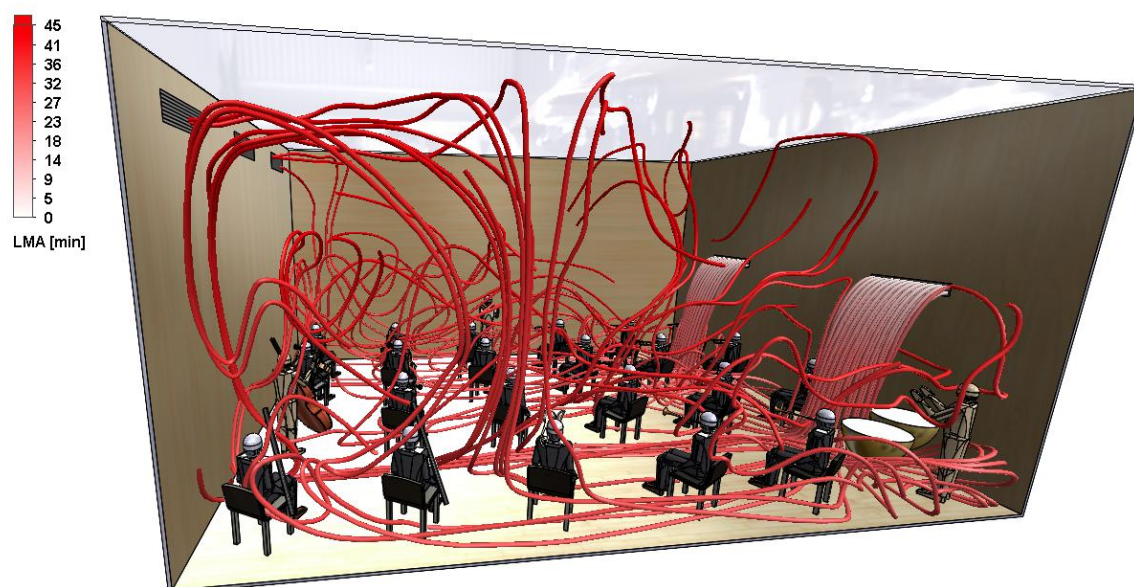


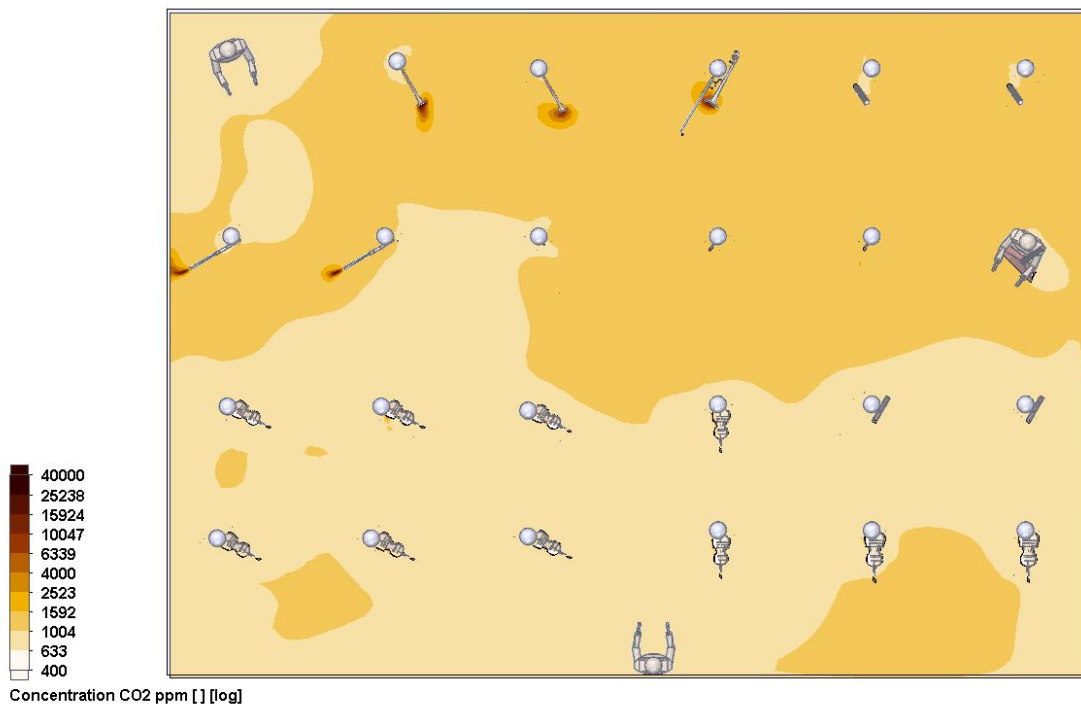
FIGURE 4.9 : Lignes de courant colorées par le LMA

4.4.2 CO_2

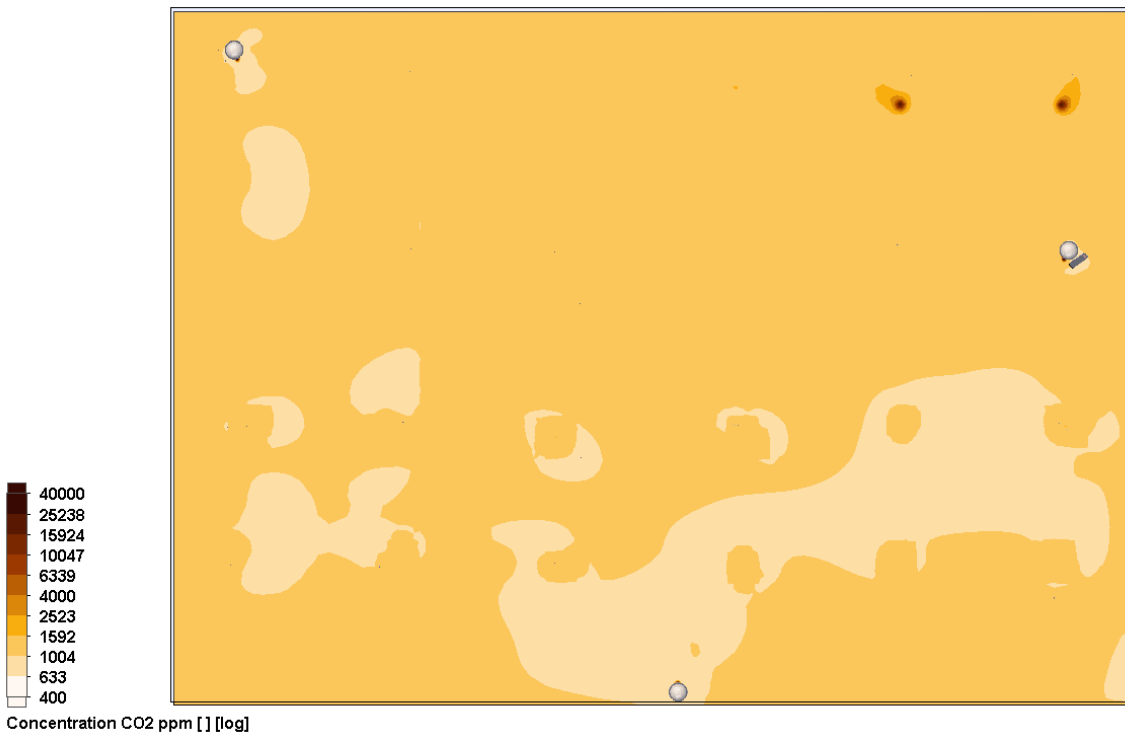
Les figures 4.10 et 4.11 présentent les concentrations de CO_2 respectivement dans la coupe médiane de la salle et dans des plans horizontaux au niveau des bouches des musiciens. La concentration moyenne est de 1080 ppm, ce qui est au-delà du critère du HCSP. On observe une stratification selon la hauteur, avec un niveau plus faible (< 1000 ppm) jusqu'aux têtes, et plus élevé au-delà. Les pics au niveau des bouches et des pavillons des instruments sont clairement visibles. On observe également une surconcentration autour de l'harmonie, du fait des débits d'air expirés plus élevés excepté pour le hautbois.



FIGURE 4.10 : Concentration de CO_2 , en ppm, dans la coupe médiane



(a) À hauteur de bouche des musiciens assis



(b) À hauteur de bouche des musiciens debout

FIGURE 4.11 : Concentration de CO_2 , en ppm, dans des plans horizontaux

4.4.3 Risque de contamination au COVID-19

On représente la distribution de probabilité P d'infection au COVID-19, après 30 min et 60 min d'exposition pour une personne respirant sans masque, selon l'origine de la contamination (chef d'orchestre sans masque, violoniste avec masque chirurgical, clarinette) dans les plans de coupe suivants :

- les plans médians des contamineurs, en vue de côté (figure 4.12) ;
- le plan horizontal à hauteur de tête des musiciens assis (figure 4.13) ;
- le plan horizontal à hauteur de tête des musiciens debout (figure 4.14).

Seuls les plans au niveau des têtes des musiciens sont intéressants pour évaluer le risque de contamination.

Les distances entre les musiciens permettent de protéger du risque d'infection, puisque la probabilité reste inférieure à 10% au bout de 60 min. Seule la clarinette génère une probabilité d'infection qui s'étend en largeur et tend à se rapprocher des autres musiciens. Plusieurs phénomènes se combinent pour accroître le risque par rapport à la respiration ; bien sûr en premier lieu le taux de quanta émis deux fois plus important et le débit d'air plus élevé de 25%, mais également :

- l'éloignement par rapport au flux ascendant de convection naturelle produit par la chaleur corporelle du clarinettiste,
- la plus faible température de l'air en sortie d'instrument par rapport à l'air soufflé, qui ne l'incite pas à monter,
- la position basse de la source (le pavillon), permettant une diffusion plus importante du fait que l'air neuf frais circule ici à proximité du sol,

Considérer que l'instrument n'émet pas en continu des aérosols du fait des pauses dans le jeu tendrait à réduire cette probabilité d'infection.

La figure 4.15 présente les iso-surfaces pour la probabilité d'infection de 10%. Les vues combinent les trois origines de contamination, mais on rappelle que le risque d'avoir 3 contamineurs parmi 25 personnes correspondrait à un taux d'incidence de 12 000. Le taux actuel en France est de 125. Le pic mesuré, atteint en Novembre 2020, était de 500.

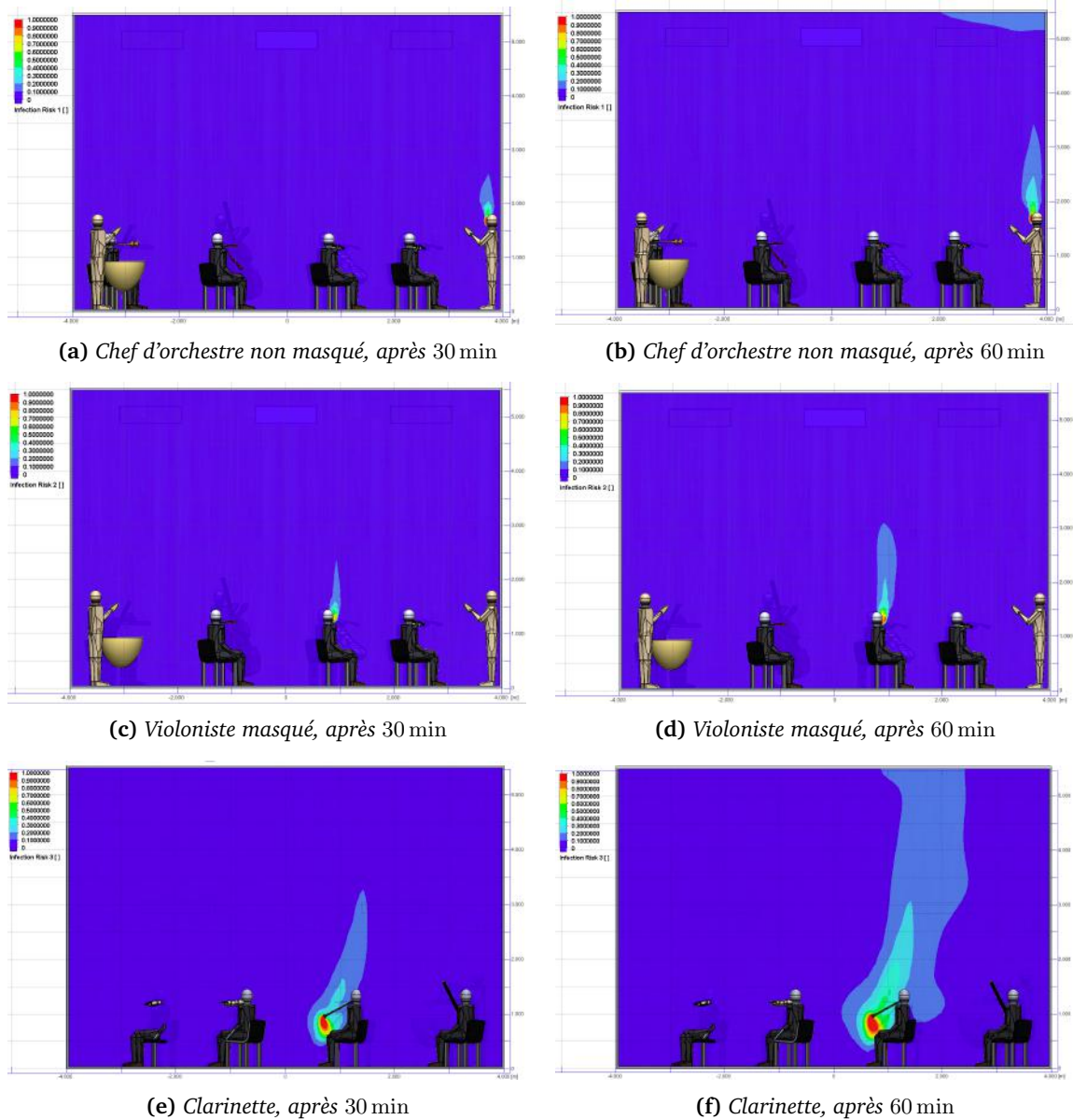
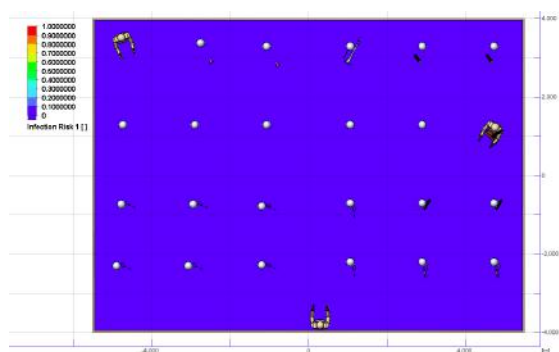
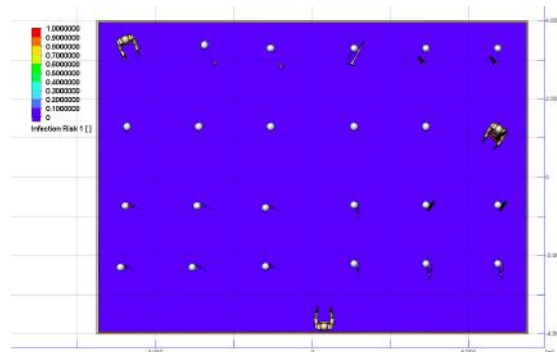


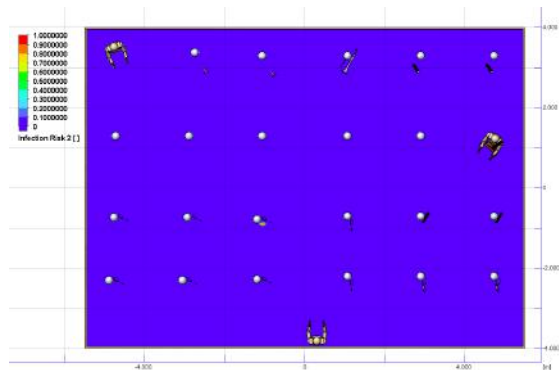
FIGURE 4.12 : Probabilité d'infection pour une personne respirant sans masque après 30 min et 60 min d'exposition, selon l'origine de la contamination, distribution dans le plan médian correspondant, en vue de côté



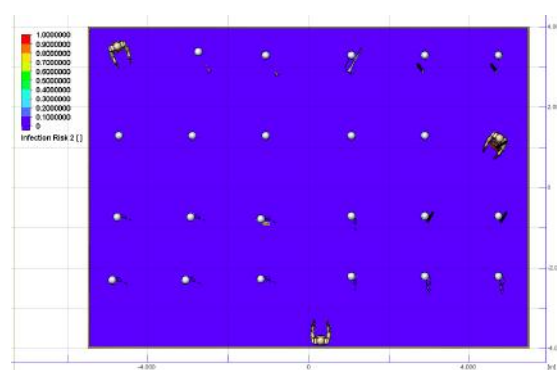
(a) Chef d'orchestre non masqué, après 30 min



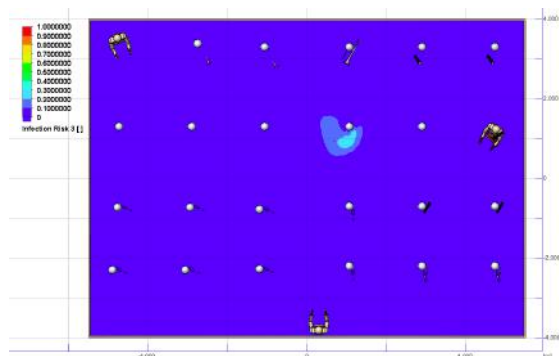
(b) Chef d'orchestre non masqué, après 60 min



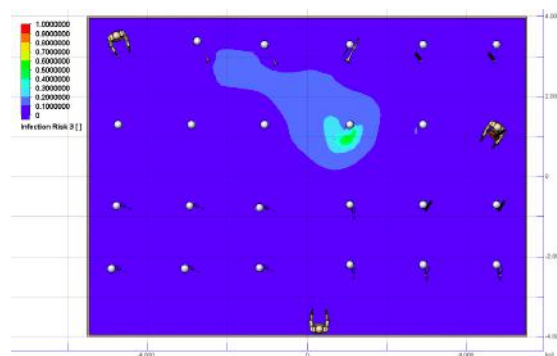
(c) Violoniste masqué, après 30 min



(d) Violoniste masqué, après 60 min



(e) Clarinette, après 30 min



(f) Clarinette, après 60 min

FIGURE 4.13 : Probabilité d'infection pour une personne respirant sans masque après 30 min et 60 min d'exposition, selon l'origine de la contamination, distribution dans le plan horizontal à hauteur des têtes des musiciens assis

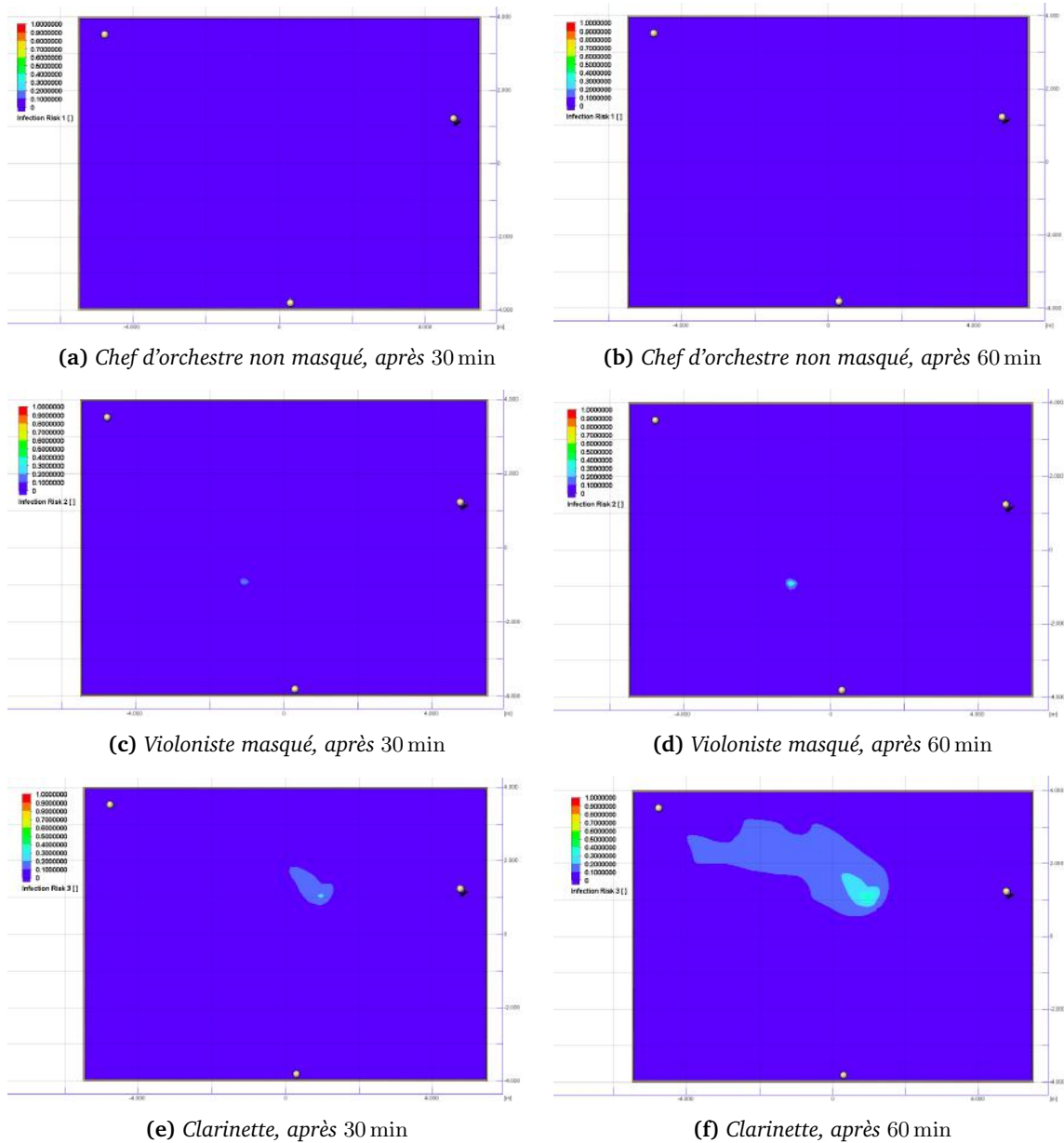
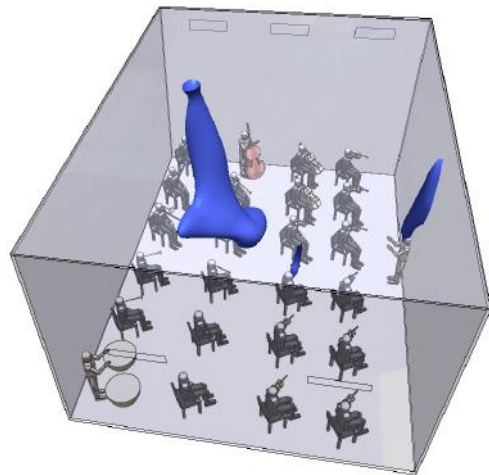
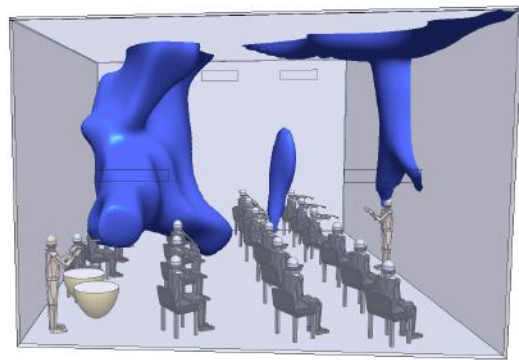


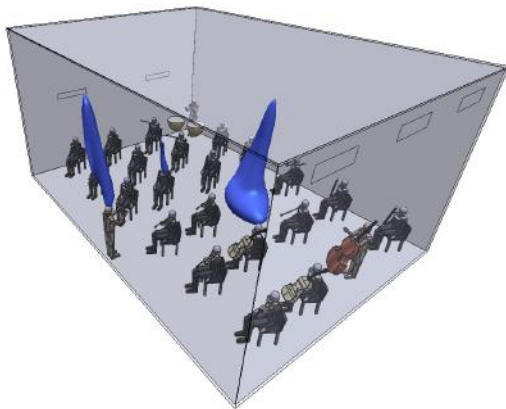
FIGURE 4.14 : Probabilité d'infection pour une personne respirant sans masque après 30 min et 60 min d'exposition, selon l'origine de la contamination, distribution dans le plan horizontal à hauteur des têtes des musiciens debout



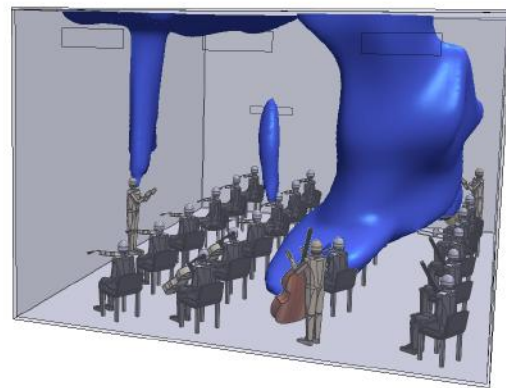
(a) Après 30 min, vue 1



(b) Après 60 min, vue 1



(c) Après 30 min, vue 2



(d) Après 60 min, vue 2

FIGURE 4.15 : Iso-surface de niveau 10% de probabilité d'infection pour une personne respirant sans masque après 30 min et 60 min d'exposition, pour les trois origines de contamination

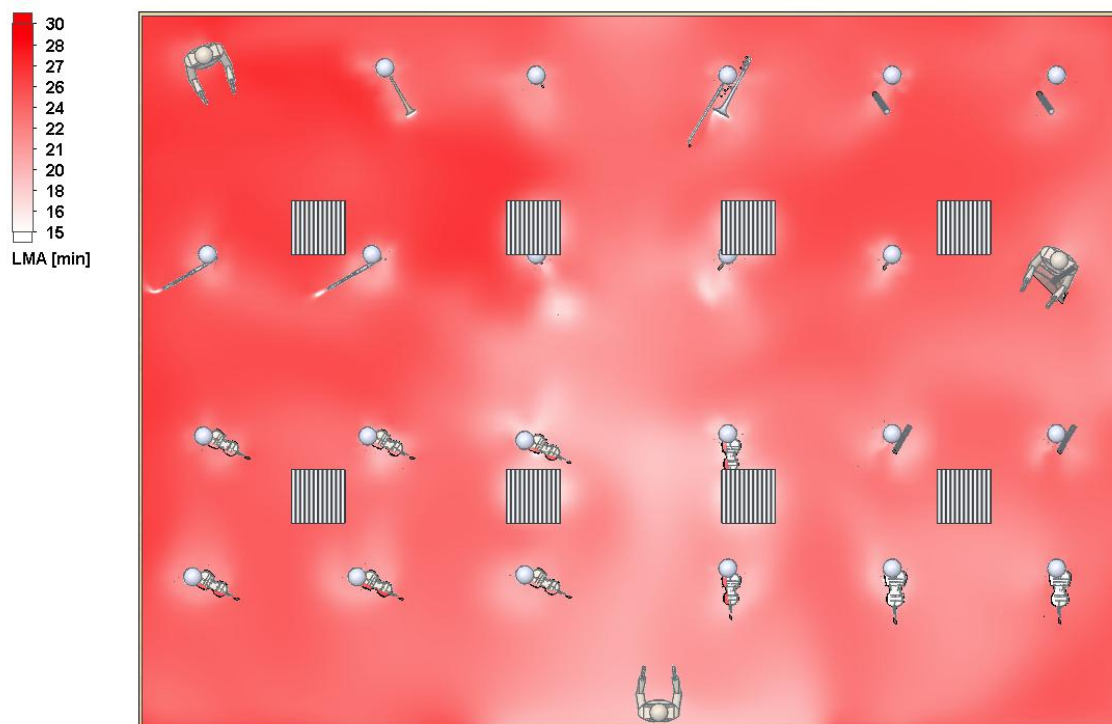
4.5 Résultats pour la configuration "ventilation plafond"

4.5.1 Renouvellement d'air

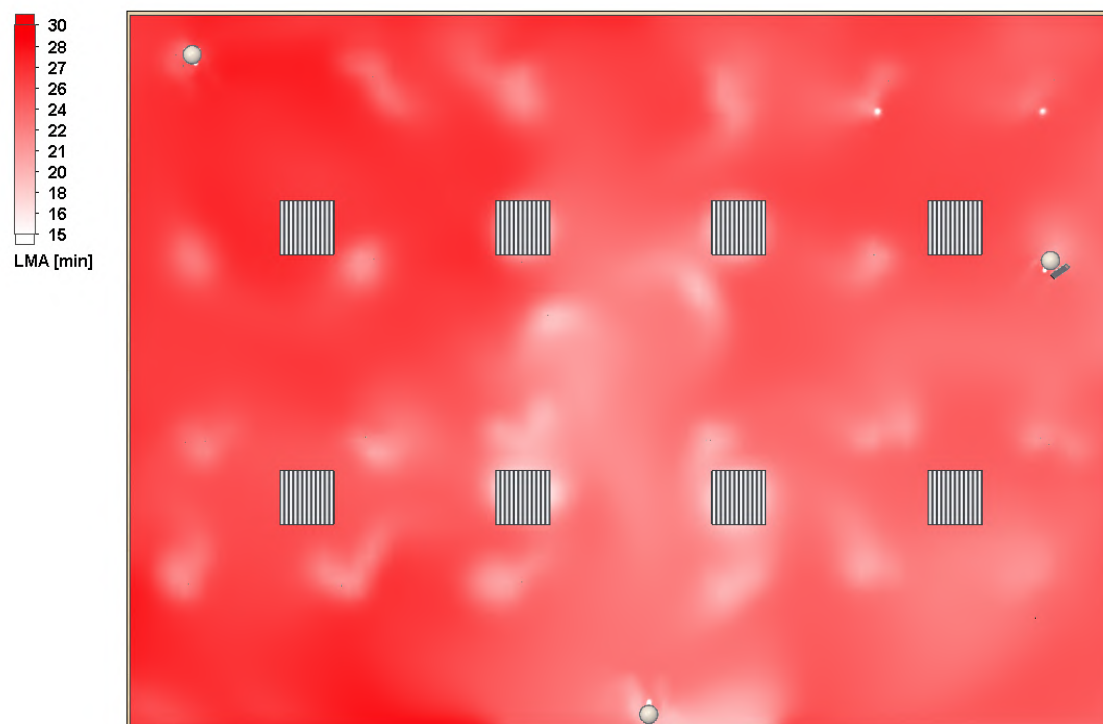
Le LMA est également relativement homogène au niveau des visages des musiciens (figure 4.16), mais à un niveau plus faible, comme attendu. Le LMA moyen dans la salle est 23 min, ce qui est à nouveau l'ordre de grandeur attendu. Le pic est de 29 min soit 25% supérieur à la moyenne, un écart à la moyenne plus faible que dans la configuration précédente.

On retrouve la stratification verticale à la fois en LMA et en température (figures 4.17 et 4.18). A proximité du sol, la température est plus faible cette fois au centre de la pièce, sous les grilles de soufflage. Il en est de même du LMA.

Les vitesses d'air sont les plus élevées sous les grilles de soufflage, et à proximité du sol. Le tracé des lignes de courant (figure 4.19) montre que les flux d'air sont verticaux sous les grilles et que les jets éclatent au sol dans toutes les directions. On observe deux boucles de recirculation au centre de la pièce, dans la coupe médiane entre les rangs d'harmonie (figure 4.18).



(a) À hauteur de bouche des musiciens assis

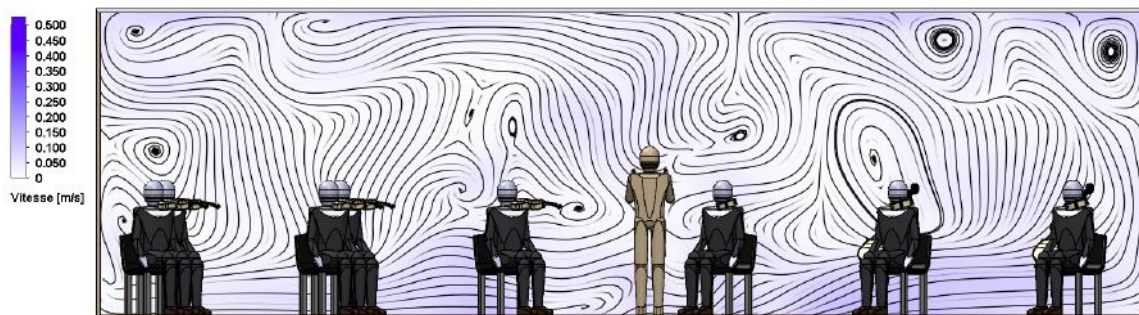


(b) À hauteur de bouche des musiciens debout

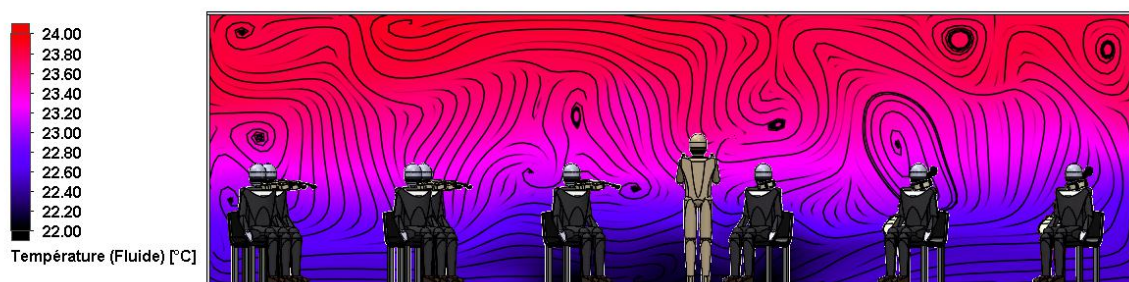
FIGURE 4.16 : LMA dans des plans de coupe horizontaux



(a) LMA



(b) Vitesse d'air



(c) Température

FIGURE 4.17 : Visualisations dans une coupe médiane de la salle



(a) LMA



(b) Vitesse d'air

FIGURE 4.18 : Visualisations dans une coupe médiane entre les rangs de l'harmonie

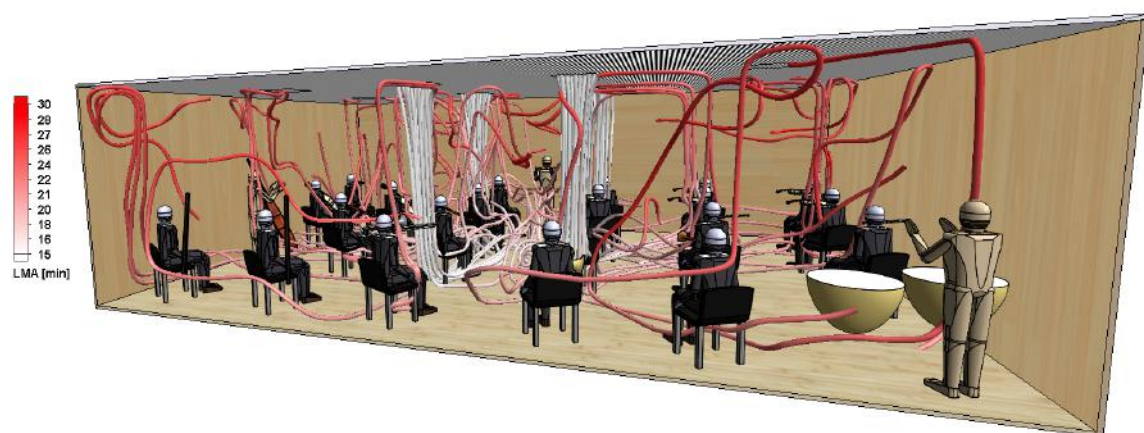


FIGURE 4.19 : Lignes de courant colorées par le LMA

4.5.2 CO_2

Les figures 4.20 et 4.21 présentent les concentrations de CO_2 respectivement dans la coupe médiane de la salle et dans des plans horizontaux au niveau des bouches des musiciens. La concentration moyenne est de 1090 ppm, un peu plus élevée que dans l'autre configuration du fait de la réduction de la hauteur sous plafond. Le système de ventilation tend à mieux homogénéiser la concentration de CO_2 : on observe toujours la stratification selon la hauteur, mais la surconcentration autour de l'harmonie est moins nette.

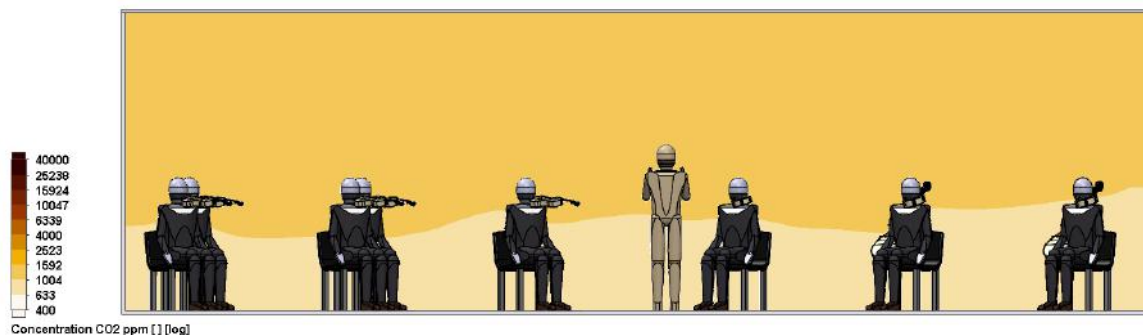
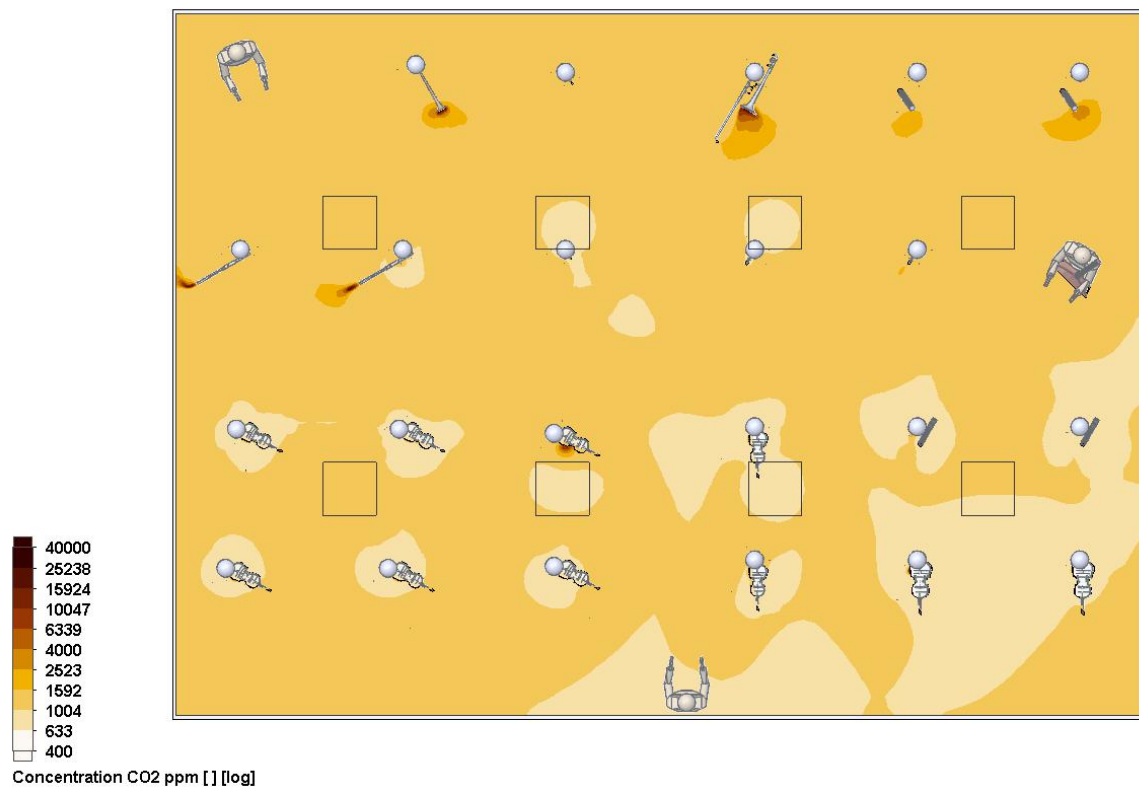


FIGURE 4.20 : Concentration de CO_2 , en ppm, dans la coupe médiane



(a) À hauteur de bouche des musiciens assis



(b) À hauteur de bouche des musiciens debout

FIGURE 4.21 : Concentration de CO_2 , en ppm, dans des plans horizontaux

4.5.3 Risque de contamination au COVID-19

On représente la distribution de probabilité P d'infection au COVID-19, après 30 min et 60 min d'exposition pour une personne respirant sans masque, selon l'origine de la contamination (chef d'orchestre sans masque, violoniste avec masque chirurgical, clarinette) dans les plans de coupe suivants :

- les plans médians des contaminateurs, en vue de côté (figure 4.22) ;
- le plan horizontal à hauteur de tête des musiciens assis (figure 4.23) ;
- le plan horizontal à hauteur de tête des musiciens debout (figure 4.24).

La figure 4.25 présente les iso-surfaces pour la probabilité d'infection de 10%.

Par rapport à la configuration de salle précédente, on note dans ce cas une probabilité d'infection qui dépasse 10% au bout de 60 min pour les personnes autour de la clarinette. Elle atteint le clarinetiste voisin ainsi qu'un altiste au premier rang. A hauteur d'une personne debout, le risque dépasse 10% sur presque toute la largeur de la pièce autour de la clarinette.

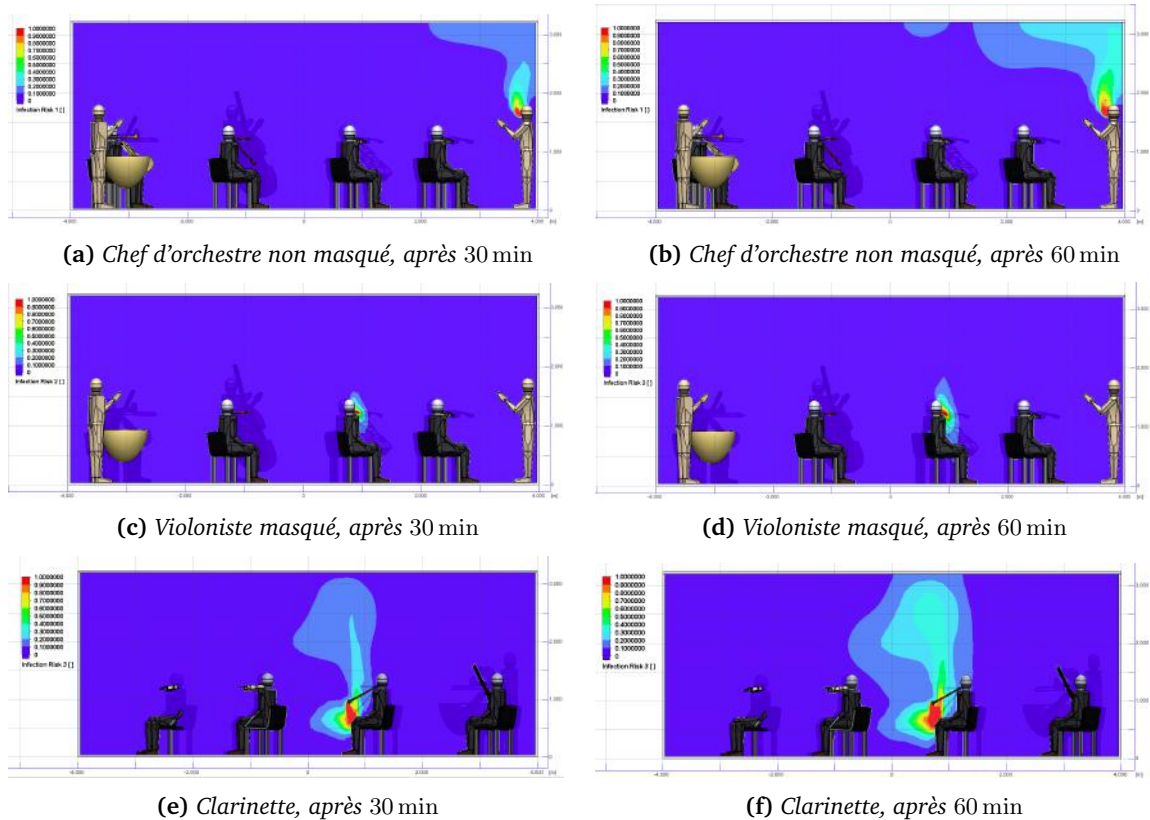
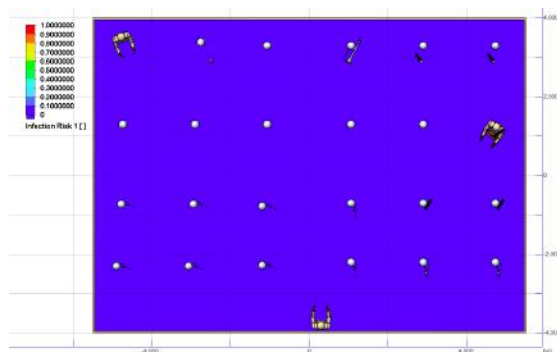
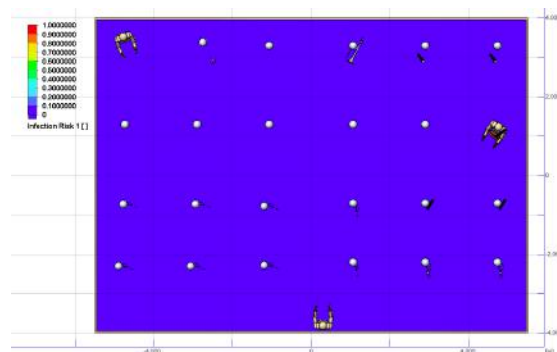


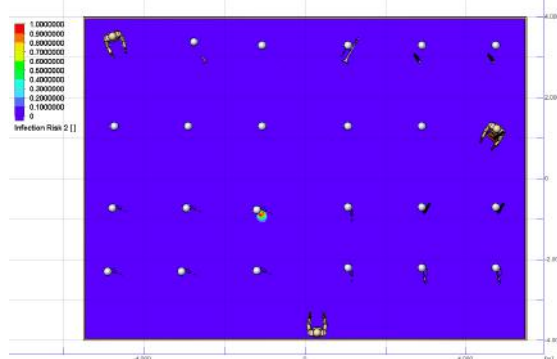
FIGURE 4.22 : Probabilité d'infection pour une personne respirant sans masque après 30 min et 60 min d'exposition, selon l'origine de la contamination, distribution dans le plan médian correspondant, en vue de côté



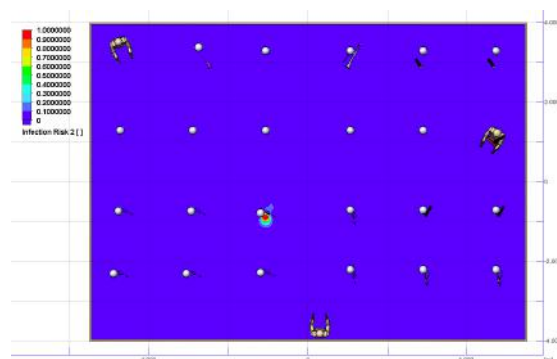
(a) Chef d'orchestre non masqué, après 30 min



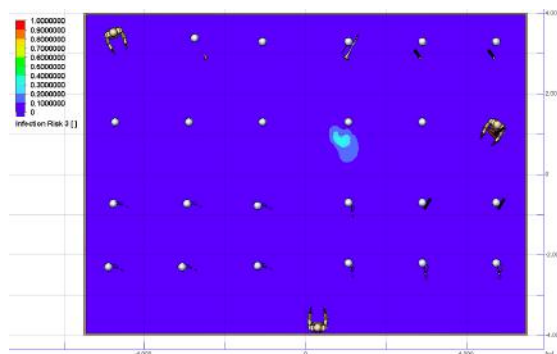
(b) Chef d'orchestre non masqué, après 60 min



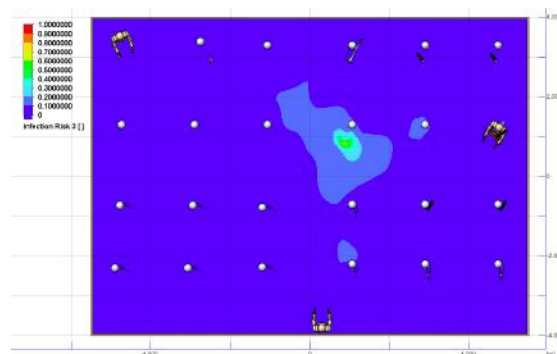
(c) Violoniste masqué, après 30 min



(d) Violoniste masqué, après 60 min



(e) Clarinette, après 30 min



(f) Clarinette, après 60 min

FIGURE 4.23 : Probabilité d'infection pour une personne respirant sans masque après 30 min et 60 min d'exposition, selon l'origine de la contamination, distribution dans le plan horizontal à hauteur des têtes des musiciens assis

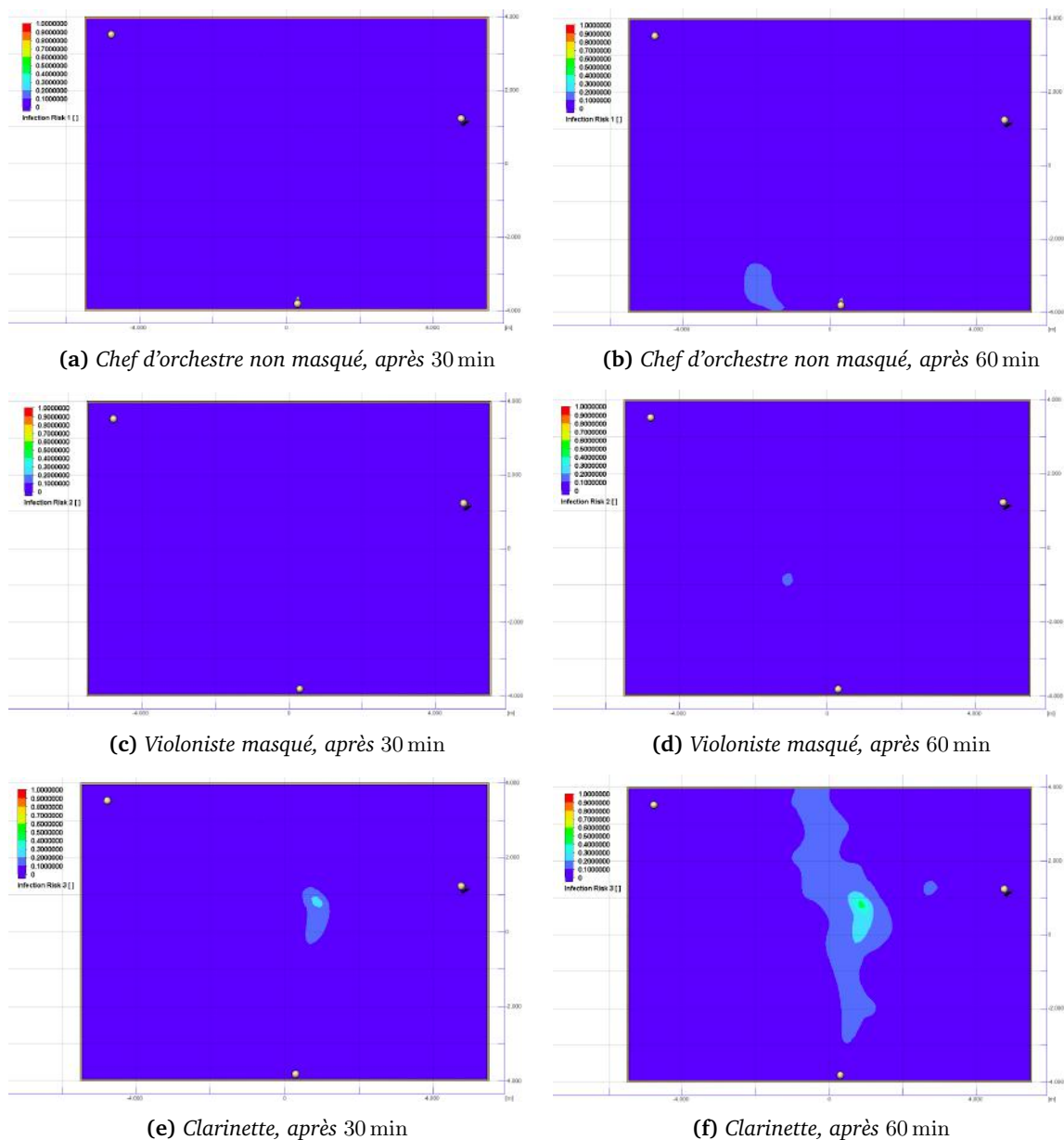
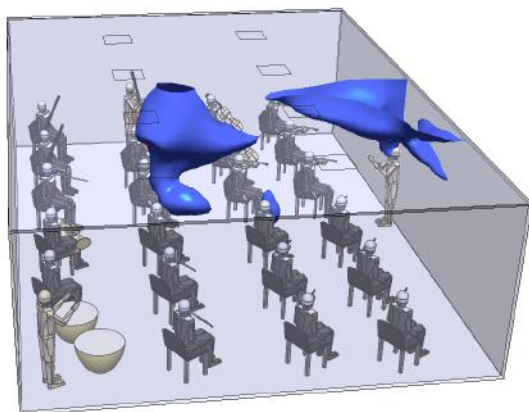
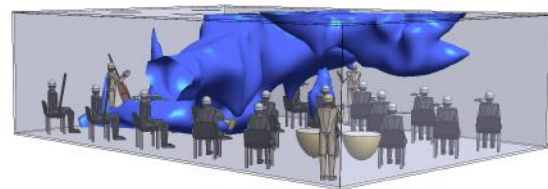


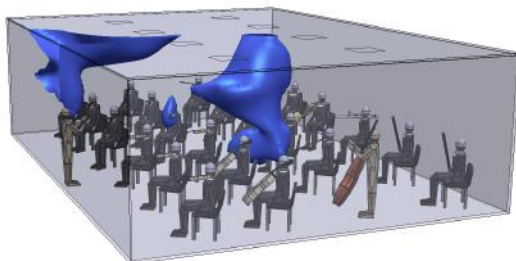
FIGURE 4.24 : Probabilité d'infection pour une personne respirant sans masque après 30 min et 60 min d'exposition, selon l'origine de la contamination, distribution dans le plan horizontal à hauteur des têtes des musiciens debout



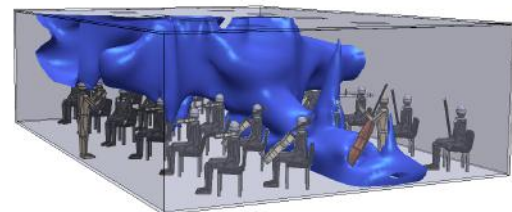
(a) Après 30 min, vue 1



(b) Après 60 min, vue 1



(c) Après 30 min, vue 2



(d) Après 60 min, vue 2

FIGURE 4.25 : Iso-surface de niveau 10% de probabilité d'infection pour une personne respirant sans masque après 30 min et 60 min d'exposition, pour les trois origines de contamination

4.6 Conclusion

Les deux configurations présentent des répartitions relativement homogènes de LMA au niveau des musiciens, à des niveaux proches de la valeur théorique attendue en raison du taux de renouvellement d'air global.

On note un lien fort entre les distributions de température et de LMA, indiquant que pour des faibles taux de renouvellement d'air, la dynamique des écoulements est dominée par la thermique. Dans ces conditions, il pourrait être intéressant d'analyser et de comparer les situations extrêmes suivantes :

- taux d'occupation élevé en période estivale,
- taux d'occupation faible en période hivernale.

L'analyse de la concentration en CO_2 révèle des taux moyens de l'ordre de 1080 ppm, supérieurs à la recommandation du HCSP (800 ppm), avec une stratification verticale qui se fait au niveau des têtes des musiciens assis.

L'évaluation de la probabilité d'infection montre un risque supérieur lorsque la contamination émane de la clarinette, par rapport au chef d'orchestre ou au violoniste. Dans les hypothèses de la simulation, elle reste inférieure à 10% après 60 min d'exposition pour une personne respirant sans masque dans le cas du soufflage latéral, mais dépasse ce seuil pour les musiciens voisins dans le cas du soufflage au plafond. La première configuration est donc préférable de ce point de vue par rapport à la seconde.

Références

- [1] *Chiffres clés du climat France, Europe et Monde*, Service des données et études statistiques (SDES) du Ministère de la Transition Ecologique, 2021
- [2] Tehya Stockman, Shengwei Zhu, Abhishek Kumar, Lingzhe Wang, Sameer Patel, James Weaver, Mark Spede, Don Milton, Jean Hertzberg, Darin Toohey, Marina Vance, Jelena Srebric, Shelly L. Miller, *Measurements and Simulations of Aerosol 1 Released while Singing and Playing Wind 2 Instruments*, submitted, 2021. <https://scholar.colorado.edu/concern/articles/hq37vp75r>
- [3] Dai, H., Zhao, B. *Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in 739 confined spaces*. Build. Simul. 13, 1321–1327, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0703-5>
- [4] He, R., Gao, L., Trifonov, M., Hong, J. *Aerosol generation from different wind instruments*. J. 760 Aerosol Sci. 151, 105669, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105669>