



AÉRAULIQUE

Validation d'un design d'une salle propre par l'outil CFD

Par G. MAHÉ, Trox France, et F. YVOREL, Merck Biodevelopment

Afin de concevoir une nouvelle unité de production, les laboratoires Merck Biodevelopment ont utilisé l'outil CFD (Computational Fluid Dynamics) pour valider un design aéraulique et comparer les solutions.

En 2018, les laboratoires Merck Biodevelopment ont pour projet d'investir dans la création d'une nouvelle unité de production à usage commercial. Le process sera réalisé en salle propre de type ISO 7/8. En phase avec l'activité process dans ces zones et la maîtrise environnementale de celle-ci, Merck recherche une approche (validation design aéraulique) permettant de valider la conception et l'implantation du process dans ces zones. L'étude repose sur une CFD poussée afin de garantir les futurs résultats aérauliques et la classe particulière des salles propres. Merck avait la volonté, si possible, de concentrer l'ensemble des réseaux aérauliques en plafond technique. Deux

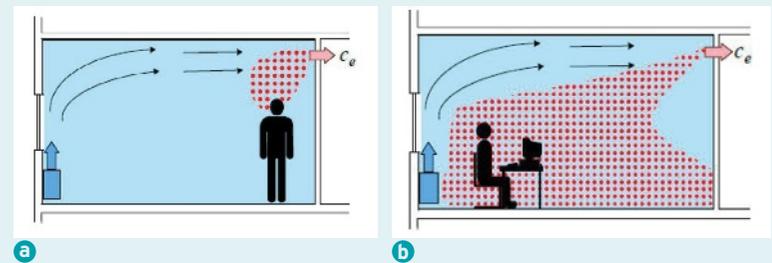
principes de diffusion d'air/ reprise d'air vont être étudiés afin de comparer les résultats et de confirmer la validité des designs pour la classification de la salle :

- design 1 : soufflage en plafond/ reprise en partie basse de la pièce ;
- design 2 : soufflage/reprise en plafond.

Brève description de la méthode CFD

Les phénomènes d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur associés aux systèmes de climatisation sont si compliqués qu'ils sont caractérisés au moyen de modèles simplifiés, normalement fondés sur l'expérience. De nombreuses incertitudes surviennent lorsque le problème présente des géométries complexes ou de fortes

1 Source de contaminant près de l'échappement



a. la source de contamination est proche de la reprise et la concentration moyenne dans la pièce est faible ; b. la concentration moyenne dans la pièce est élevée.

sources de chaleur. L'objectif de la dynamique des fluides dynamiques (CFD) est de comprendre les événements physiques qui se produisent dans le flux autour et à l'intérieur des objets et des limites désignées.

Ces événements sont liés à l'action et à l'interaction de phénomènes tels que la dissipation, la diffusion, la convection, les couches limites et la turbulence. Dans la forme la plus générale, tous ces phénomènes sont régis par les équations de Navier-Stokes.

De nombreux aspects importants de ces relations sont non linéaires et, en conséquence, une solution

analytique ne peut être obtenue. Cela motive l'utilisation de techniques de résolution numérique pour les équations aux dérivées partielles régissant la physique de l'écoulement des fluides.

La première étape de la mise en place du calcul implique la spécification du problème, y compris la géométrie, le maillage et les conditions d'écoulement. La géométrie peut résulter de mesures d'une configuration existante ou être associée à une étude de conception. Les méthodes numériques nécessitent un maillage infinitésimal pour augmenter la précision des résultats obtenus.

Une fois le problème spécifié, un ensemble approprié d'équations et de conditions aux limites doit être sélectionné. Les phénomènes d'importance pour le domaine de la dynamique des fluides sont régis par la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, ce qui conduit aux équations de Navier-Stokes

Le succès d'une simulation dépend en grande partie de la perspicacité technique impliquée dans la sélection des équations gouvernantes et des modèles physiques reposant sur la spécification du problème. La CFD est la voie royale pour définir une installation complète et déterminer le bon design pour l'optimiser. La **figure 1** montre un système de ventilation où un court-circuit de l'air de ventilation se produit. Sur la **figure 1a**, la source de contamination est proche de la reprise et la concentration moyenne dans la pièce est faible. Sur la **figure 1b**, la concentration moyenne dans la pièce est élevée.

Dans les deux cas, la concentration dans l'air repris est la même si le taux d'émission du contaminant et le débit de ventilation sont les mêmes. En supposant que l'air serait parfaitement mélangé, la concentration de contaminant serait la même dans toute la pièce et égale à la concentration de contaminant dans la reprise. Un système de ventilation donne rarement une situation entièrement mélangée et les emplacements pour la génération de contaminants sont dans la plupart des cas inconnus ou inconstants. Cela nécessite une autre méthode de mesure plus générale. Cette méthode générale doit quantifier l'efficacité de la ventilation du système par sa capacité à renouveler l'air dans une pièce. Le concept de l'âge de l'air a été introduit par Sandberg (1981) et

s'est avéré être un outil utile pour évaluer l'efficacité de la ventilation. L'âge moyen de l'air est un concept statistique fondé sur la répartition par âge des composantes de l'air en un point.

L'âge est compté à partir du moment où l'air entre dans la pièce (**figure 2**). L'air en un point donné est un mélange de composants qui ont passé un temps différent dans la pièce pendant lequel ils ont été contaminés. L'âge moyen de l'air est donc une mesure de la qualité de l'air en un point donné. Dans une situation entièrement mixte, l'âge moyen local de l'air sera le même dans toute la pièce. S'il y a un raccourci entre le soufflage et la reprise, l'âge moyen local de l'air sera faible dans la zone court-circuitée et élevé dans la zone stagnante. Dans la reprise, l'âge moyen local de l'air est toujours (également dans le cas d'un écoulement de court-circuit) égal à la constante de temps nominale t_n . V est le volume de la pièce et Q le débit de ventilation.

Le taux de renouvellement d'air, souvent utilisé pour quantifier la ventilation, est la valeur inverse de la constante de temps nominale. L'âge moyen de tout l'air (t_{moyen}) présent dans la pièce est égal à la moyenne spatiale des âges moyens locaux de l'air.

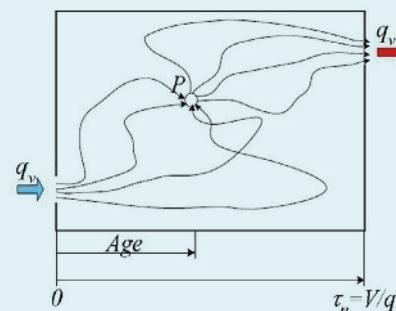
Le temps de renouvellement de l'air pour tout l'air de la pièce t_r est égal à deux fois l'âge moyen de l'air de la pièce : $t_r = 2 \times t_{\text{moyen}}$. L'efficacité du renouvellement d'air ϵ_a est une mesure de la rapidité avec laquelle l'air de la pièce est remplacé par rapport au cas théorique le plus rapide avec le même débit d'air de ventilation. Le temps de renouvellement d'air le plus court possible pour l'air de la pièce est obtenu uniquement avec un flux de type piston. ➔

A Efficacité du changement d'air en fonction du modèle de flux

Modèle de flux	Efficacité de renouvellement d'air ϵ_a
Flux piston idéal	100 %
Flux de déplacement d'air	$50 \% \leq \epsilon_a \leq 100 \%$
Flux totalement turbulent	50 %
Flux en court-circuit	$\epsilon_a \leq 50 \%$

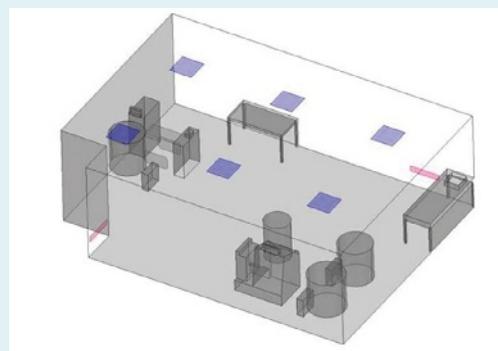
L'efficacité est le rapport entre la constante de temps nominale et le temps de renouvellement de tout l'air de la pièce.

2 Âge de l'air



Ce concept a été inventé par Sandberg en 1981.

3 Local (design 1)



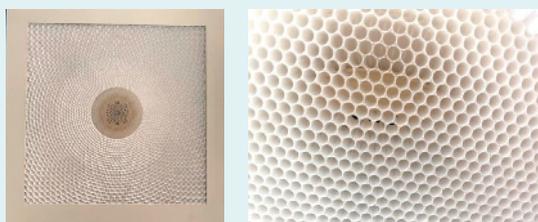
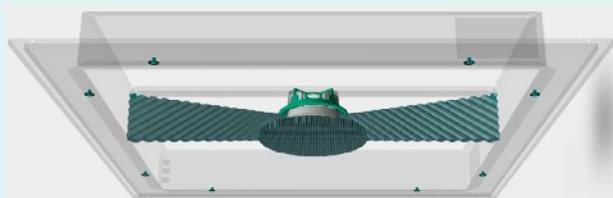
En bleu, les six diffuseurs de soufflage. En rose, les grilles de reprise près du sol (design 1).

B Données de l'étude

Diffuseur de soufflage Trox ProConDif Quantité : 6	562,5 m ³ /h
Diffuseur de reprise Trox grille AH Quantité : 2	1 687,5 m ³ /h

Le débit de soufflage et reprise est identique dans les deux cas : 3 375 m³/h.

4 Diffuseur ProConDif



La structure alvéolaire en nid d'abeilles produit un jet profilé.

→ L'efficacité de renouvellement d'air ε_a est définie par le rapport suivant :

$$\varepsilon_a = t_n / t_r, \text{ soit } \varepsilon_a = t_n / (2 \times t_{\text{moyen}}) (\%)$$

Le **tableau A** montre l'efficacité du changement d'air pour plusieurs modèles de flux d'air bien connus.

Les données de l'étude

Le local est configuré de deux manières pour faire une analyse comparative des résultats (**figure 3, tableau B**). Le débit de soufflage et reprise est identique dans les deux cas : $3\,375 \text{ m}^3/\text{h}$.

Volume du local : $148,4 \text{ m}^3$

Taux de brassage :

$$3\,375 / 148,4 = 22,8 \text{ vol/h}$$

Design 1

6 diffuseurs de soufflage ProConDif Trox.

2 grilles de reprises au mur proche du sol type AH Trox $625 \times 325 \text{ mm}$.

Design 2

6 diffuseurs de soufflage ProConDif Trox.

2 grilles de reprises au plafond type AH Trox $625 \times 325 \text{ mm}$.

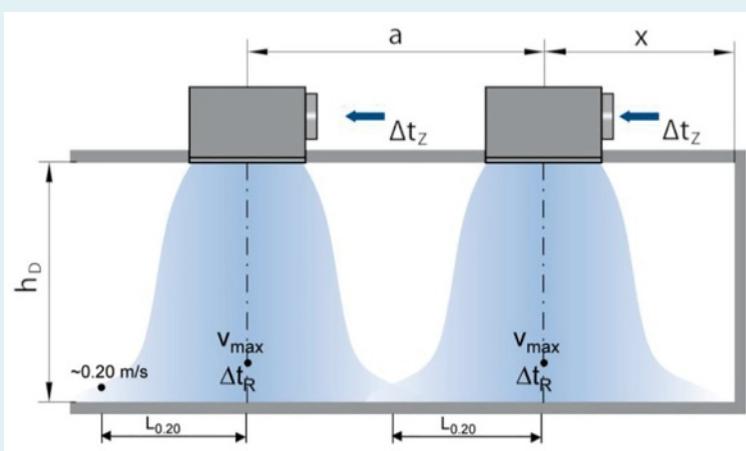
Le diffuseur ProConDif

La méthode ProConDif s'appuie sur un profil de vitesse contrôlé à la surface du diffuseur : *Profile Controlled Diffusion*. La structure alvéolaire en nid d'abeilles à haute section de passage permet la production d'un jet profilé. La résultante est une diffusion en forme de cloche avec une faible induction de l'air autour. La veine d'air se déplace jusqu'au sol pour évacuer les polluants (**figure 4**).

Méthode de sélection du diffuseur

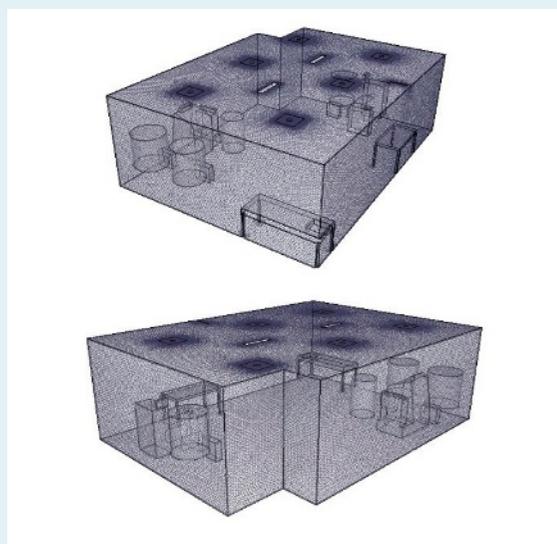
Dans le cas de nos études nous avons sélectionné un écartement de diffuseur permettant d'assurer que les rayons de diffusion se rejoignent pour garantir la poussée jusqu'au sol de l'air sur toute la surface du local. Pour une hauteur d'installation de

5 Zone de travail des diffuseurs



L'écartement des diffuseurs permet d'assurer que les rayons de diffusion se rejoignent.

6 Maillage



Le maillage comporte 2,2 millions de points.

2,7 mètres et un débit par diffuseur de 562,5 m³/h, le rayon d'action du diffuseur est de 1,50 mètre pour obtenir une vitesse résiduelle proche du sol de 0,2 m/s. La zone de travail de chaque diffuseur est donc une surface de 7 m² (figure 5).

Les diffuseurs ont été espacés de 3 mètres pour assurer une décontamination efficace. Une vitesse d'air supérieure ou égale à 0,2 m/s proche du sol garantit une bonne évacuation de l'air pollué.

Plage de travail du diffuseur

Plage de débit : 250 à 700 m³/h.

Plage de température : le ΔT admissible entre ambiance et soufflage

« Dans les zones avec des équipements, il est essentiel d'effectuer des itérations de calcul très rapprochées pour réduire l'incertitude des résultats. »

est à déterminer en fonction des caractéristiques de l'étude (débit, hauteur d'installation, écartement des diffuseurs)

Le maillage réalisé comporte 2,2 millions de points (figure 6). C'est le rapprochement des points qui permet en partie de garantir l'exactitude des résultats. Dans les zones avec des équipements, il est essentiel d'effectuer des itérations de calcul très rapprochées pour réduire l'incertitude des résultats.

Les résultats de l'étude

Les grandeurs analysées sont la vitesse de l'air et l'âge de l'air. Pour rappel, le design 1 est celui

avec reprise sur le mur proche du sol, le design 2 celui avec reprise en plafond.

Étude 1 : les vitesses d'air

Les échelles de vitesse sont identiques. On constate une répartition similaire du soufflage dans les deux cas d'étude (figure 7). Pour la reprise au sol, on remarque que les grilles ont une zone d'influence non négligeable et que c'est la zone où les vitesses d'air sont les plus élevées (zone en rouge dans la figure 7a). Ce phénomène est appelé « court-circuit » d'air. Le court-circuit réalisé par les grilles de reprise murales →

LE SALON PHARMACOSME TECH ÉVOLUE ET DEVIENT

**PHARMA
COSME** TECH 

Les solutions industrielles pour la **santé** & la **beauté**

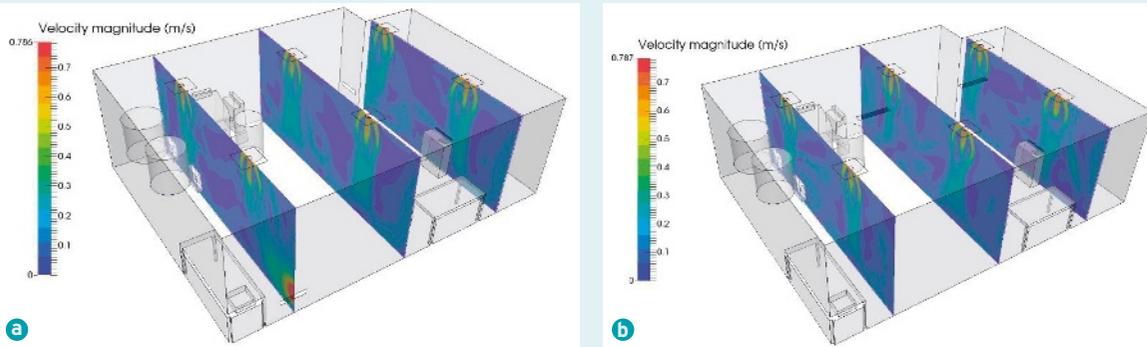
Le salon des services, équipements et process pour **l'industrie pharmaceutique**

14/15/16 SEPTEMBRE 2021

CHARTRES / CHARTREXPO / 3^e édition

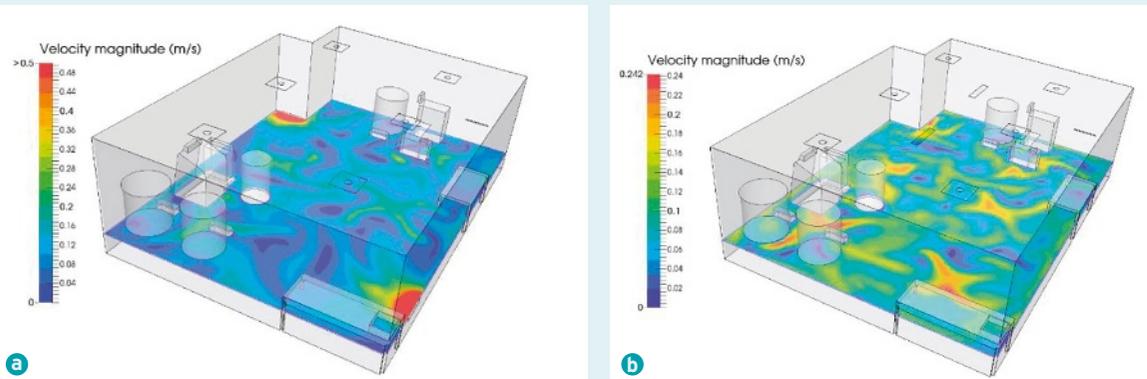


7 Vitesses de l'air en fonction de la hauteur



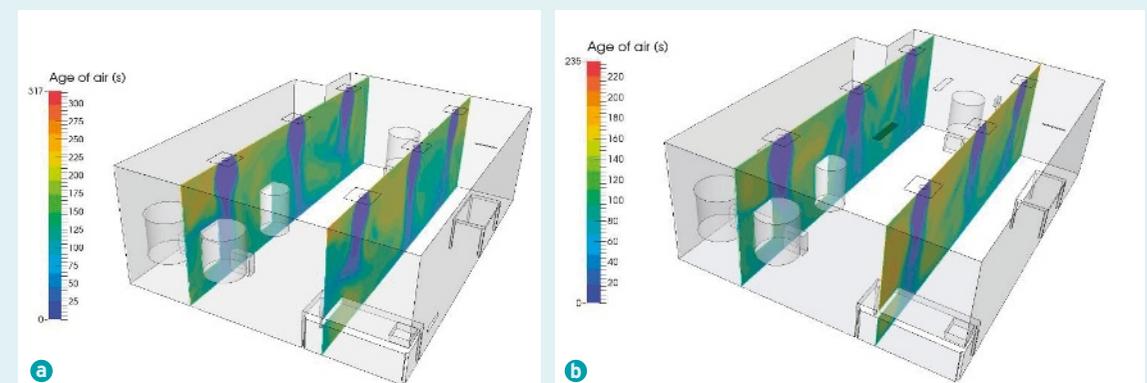
a. design 1 ; b. design 2.

8 Vitesse de l'air au niveau du sol



a. design 1 ; b. design 2.

9 Âge de l'air en fonction de la hauteur



a. design 1 ; b. design 2.

→ restreint le déplacement de l'air et empêche le flux d'air de se comporter en effet proche du déplacement théorique piston. En effet l'intégralité du flux d'air ne peut pas arriver jusqu'au sol et participer à la décontamination du local car une partie est directement évacuée par les grilles de reprise murales. Les échelles de vitesse ne sont pas identiques (figure 8). On saisit l'influence de la grille de reprise près du sol sur son environnement sur la figure 8a.

Étude 2 : l'âge de l'air

Design 1 : reprise sur le mur proche du sol

L'âge de l'air moyen calculé par la CFD est de 143 secondes (figure 9a). C'est-à-dire qu'en moyenne une molécule d'air transite pendant 143 secondes dans le local avant d'être évacuée. Remarque : l'air qui sort des diffuseurs a un âge de l'air qui tend vers 0, car c'est de l'air neuf.

Design 2 : reprise en plafond

L'âge de l'air moyen calculé par la CFD est de 120 secondes (figure 9b), c'est-à-dire, qu'en moyenne une molécule d'air transite pendant 120 secondes dans le local avant d'être évacuée.

Quand on compare les variations de l'âge de l'air sur une hauteur donnée (ici à 0,5 mètres du sol), on constate que, dans le cas de reprise au sol, l'âge de l'air peut monter localement jusqu'à 216 secondes contre 153 secondes pour la reprise en plafond (figure 10).

Étude 3 : iso-âge de l'air

En figure 11 nous avons généré l'ensemble des points dans le local avec un âge de l'air de 160 secondes. On remarque que, dans le cas de la reprise au plafond, l'évacuation de l'air du local est bien plus rapide.

Les conclusions de l'étude

On constate que les deux designs respectent les paramètres aérodynamiques de ce type de zone. Dans notre cas, la solution soufflage/reprise au plafond apporte un résultat meilleur sur l'âge de l'air. On passe de 143 secondes à 120 secondes, soit un âge de l'air 20 % plus important avec des reprises au sol.

L'efficacité du renouvellement d'air est $\varepsilon_a = 58,05 \%$ avec les reprises en plafond et $\varepsilon_a = 48,71 \%$ avec les reprises au sol. Les grilles de reprise au sol empêchent

l'air propre d'arriver totalement jusqu'au sol et de bien balayer le local pour évacuer les polluants : phénomène de court-circuit d'air. La CFD a permis de valider les deux designs, cependant le second design apporte aussi les avantages suivants :

- augmentation des surfaces utiles au sol ;
- réduction de la complexité de passage des réseaux aérodynamiques.

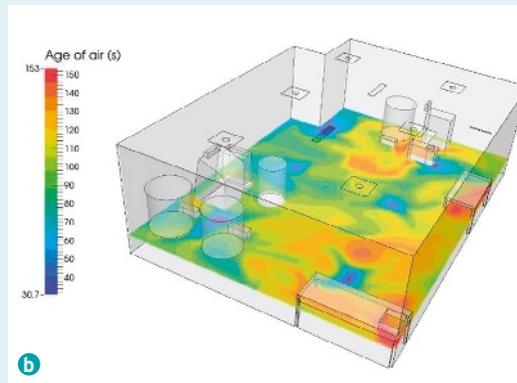
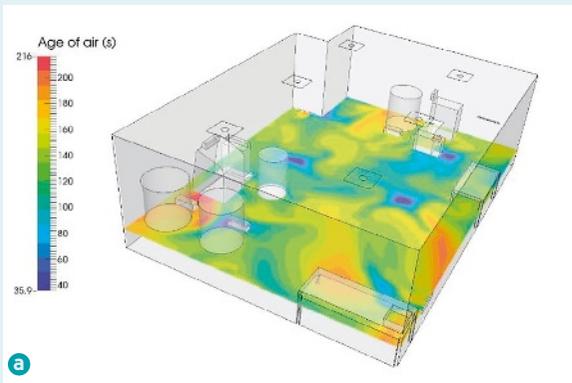
Ce second design a été retenu dans le cadre de la création de la nouvelle unité de production de Merck

Biodevelopment sur le site de Martillac (Gironde). Les résultats de l'étude ne peuvent pas être généralisés à tous les projets sans validation préalable.

Parmi les projections futures envisagées, il est envisagé de réduire les consommations énergétiques dans le cadre de l'ISO 50001 en baissant le taux de renouvellement d'air. Le modèle CFD permettra d'étudier en amont la décontamination mais aussi d'obtenir des résultats permettant d'orienter de futures réflexions. ■

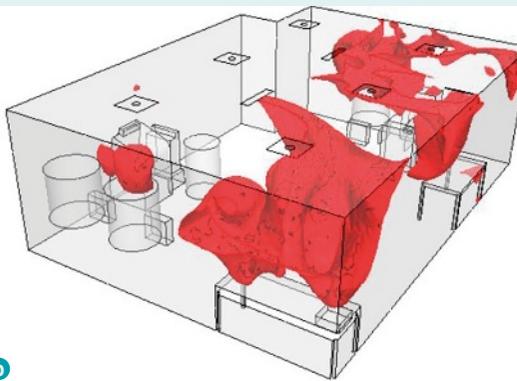
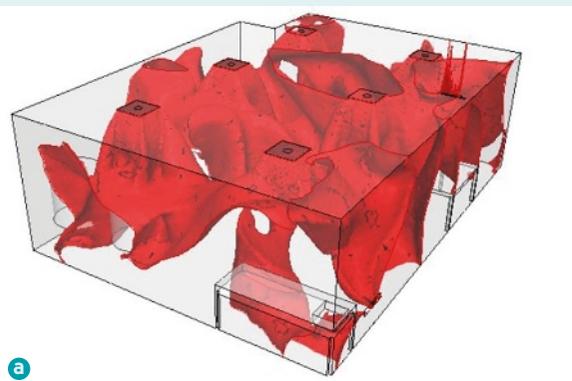
« Les grilles de reprise au sol empêchent l'air propre d'arriver totalement jusqu'au sol et de bien balayer le local pour évacuer les polluants (phénomène de court-circuit d'air). »

● Âge de l'air au niveau du sol



a. design 1 ; b. design 2.

● Iso-âge de l'air



Les points représentés sont ceux avec un âge de l'air de 160 secondes. a. design 1 ; b. design 2.