

## Introduction

Parmi les enveloppes des bâtiments (i.e., les murs, les toits et les fenêtres), la fenêtre est principalement responsable des pertes de chaleur des bâtiments. Au cours des dernières décennies, de nombreuses technologies avancées ont été proposées pour améliorer les performances des fenêtres. Bien qu'un certain nombre de technologies avancées aient été développées, certaines d'entre elles ne peuvent pas être appliquées aux bâtiments anciens dont l'apparence doit être maintenue. La double-fenêtres en mode insufflation attire notre attention en raison de ses multiples avantages. Premièrement, elle peut être une solution de rénovation appropriée pour les bâtiments protégés en ajoutant une fenêtre supplémentaire à l'intérieur de l'ancienne fenêtre, sans endommager la structure et l'apparence du bâtiment. Deuxièmement, elle peut fournir de l'air frais afin d'améliorer la qualité de l'air intérieur. Troisièmement, elle peut préchauffer l'air frais avant qu'il entre dans la pièce et ainsi réduire la charge de chauffage de la ventilation. Quatrièmement, son utilisation n'affecte pas la vue sur l'extérieur. En fait, les fenêtres des immeubles protégés des villes françaises également appelés Haussmann constituent un pourcentage élevé de leurs façades (plus de 65 %). Ainsi, une amélioration de la performance des fenêtres contribuera fortement à l'amélioration de la performance globale des bâtiments.

La U-valeur est un indicateur important pour caractériser la performance thermique des fenêtres. Elle est souvent utilisée dans les outils de simulation de bâtiments tels qu'EnergyPlus pour simuler les performances énergétiques. En outre, l'identification précise de la U-valeur peut faciliter la prise de décision lors de la conception et de la rénovation des bâtiments. La U-valeur conventionnelle est définie comme la quantité de pertes de chaleur à travers les fenêtres par m<sup>2</sup> pour un degré de différence de température entre les environnements intérieur et extérieur. Bien que plusieurs études aient été proposées pour les U-valeurs des double-fenêtres en mode insufflation, une exploration plus approfondie est encore nécessaire pour répondre aux questions suivantes.

(1) La méthode GHB est suggérée pour tester les U-valeurs des fenêtres, mais la méthode GHB standardisée n'est pas adaptée pour les double-fenêtres en mode insufflation. En particulier, l'existence d'un canal d'écoulement d'air ajoute des difficultés pour tester avec précision les U-valeurs des double-fenêtres en mode insufflation. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une méthode GHB ajustée en améliorant la mise en place du GHB et le processus de calibration.

(2) Bien que certaines analyses paramétriques aient été réalisées pour les U-valeurs des double-fenêtres en mode insufflation, il n'existe pas d'analyse de sensibilité permettant de comparer les effets des différents paramètres sur les U-valeurs. Pour résoudre ce problème, un modèle CFD a été établi et différents paramètres ont été étudiés, notamment la surface de la fenêtre, la conductivité thermique du châssis interne/externe de la fenêtre, le débit d'air, le coefficient de transfert convectif interne/externe, les températures de l'air interne/externe. En outre, les impacts des différents paramètres sur les U-valeurs sont comparés en basant une analyse de sensibilité.

(3) Les U-valeurs des double-fenêtres en mode insufflation varient en fonction des conditions aux limites, et donc une seule U-valeur ne peut pas bien refléter la performance thermique de la fenêtre et aider à la prise de décision. Dans cette optique, un outil facile à utiliser est nécessaire pour que les utilisateurs puissent obtenir des U-valeurs dans différentes conditions. Considérant que le modèle CFD nécessite des connaissances techniques et un coût de calcul élevé, différents modèles de régression (c'est-à-dire les modèles MLR, SVR, KNN, RFR, ETR, GBR et XGBR) sont analysés

et comparés pour déterminer une nouvelle méthode de calcul.

(4) Les exigences de la U-valeur minimale sont données dans les normes pour aider à réaliser les propositions d'économie d'énergie des bâtiments. Cependant, il n'est pas facile pour les utilisateurs de rénover une vieille fenêtre en une double-fenêtre en mode insufflation pour répondre aux exigences données dès la phase de conception. Pour faciliter le travail de rénovation des utilisateurs qui souhaitent transformer une double-fenêtre en mode insufflation, nous proposons un cadre d'identification inverse. Ce cadre peut fournir des exigences simples pour les paramètres de conception de la rénovation, tels que la U-valeur minimale de la fenêtre secondaire et le débit d'air minimal.

## **Résumé de chaque chapitre**

Le premier chapitre présente le contexte et la définition, le calcul et l'identification des U-valeurs des fenêtres.

Le deuxième chapitre présente une revue des technologies et des performances des fenêtres multi-vitrage. Les performances de différentes technologies sont également comparées.

Le troisième chapitre présente le dispositif expérimental et les résultats. Dans ce chapitre, une méthode de boîte chaude gardée (GHB) ajustée est proposée. Sur la base des méthodes GHB conventionnelle et ajustée, les U-valeurs d'une fenêtre à simple vitrage, d'une fenêtre à double vitrage, d'une fenêtre à double vitrage Low-E, de trois double-fenêtres et de trois double-fenêtres en mode insufflation sont mesurées et comparées.

Le quatrième chapitre présente le modèle numérique et les résultats de la simulation. Dans ce chapitre, un modèle CFD tridimensionnel est établi et il est validé par les données expérimentales de la GHB. Sur la base du modèle validé, une étude paramétrique complète est réalisée pour comparer les effets de différents paramètres de la fenêtre et des paramètres de conditionn aux limites sur les U-valeurs des double-fenêtres en mode insufflation.

Le cinquième chapitre analyse et compare les performances de différentes méthodes de régression pour déterminer les U-valeurs dynamiques d'une double-fenêtres en mode insufflation. En particulier, les modèles de régression sont formés et optimisés sur la base de l'ensemble de données collectées à partir de simulations CFD. L'impact de la taille du jeu de données sur les performances du modèle est également discuté.

Le sixième chapitre propose un cadre d'identification inverse pour les double-fenêtres rénovées afin de fournir des exigences pour les paramètres de conception de rénovation. Dans ce chapitre, une étude de cas est réalisée avec et sans prise en compte des incertitudes des conditions aux limites. Sur la base de cette étude de cas, les exigences relatives au débit d'air dans le cadre de scénarios déterministes et de scénarios incertains sont comparées et discutées.

Enfin, le septième chapitre présente les conclusions et les travaux futurs sur le sujet.

## **Conclusion**

Les principales conclusions des expériences sont résumées comme suit :

(1) Par rapport à la fenêtre à simple vitrage, les U-valeurs des double-fenêtres sont réduites de 45,0 %, 58,3 % et 68,6 % en ajoutant la fenêtre à simple vitrage, la fenêtre à double vitrage et la fenêtre à double vitrage Low-E comme fenêtre secondaire, respectivement.

(2) Par rapport à la fenêtre à simple vitrage, les U-valeurs des double-fenêtre en mode insufflation sont réduites de 64,7 %, 81,9 % et 85,3 % en ajoutant la fenêtre à simple vitrage, la fenêtre à double vitrage clair et la fenêtre à double vitrage Low-E comme fenêtre secondaire, respectivement. Les double-fenêtre en mode insufflation ont un potentiel de réduction de la U-valeur plus important que les double-fenêtres.

(3) Les écarts entre la U-valeur au centre du verre et la U-valeur totale sont de l'ordre de 19,0 % à 45,5 % pour différentes configurations de fenêtres. Cela indique que l'utilisation de la U-valeurs au centre du verre dans le code du bâtiment entraînera des erreurs importantes.

Les principales conclusions des simulations CFD sont résumées comme suit :

(1) Pour une taille de fenêtre plus grande, les valeurs  $U_{loss}$  et  $U_{use}$  sont plus faibles tandis que la valeur  $U_{eq}$  est plus élevée.

(2) Pour la conductivité thermique du châssis d'une fenêtre intérieure et le coefficient de transfert convectif interne, leurs effets sur les valeurs  $U_{loss}$ ,  $U_{use}$  et  $U_{eq}$  sont similaires. En particulier, lorsque la valeur du paramètre étudié augmente, la valeur des pertes en U, la valeur d'utilisation en U et la valeur  $U_{eq}$  sont toutes augmentées.

(3) Pour la conductivité thermique du châssis d'une fenêtre extérieure et le coefficient de transfert convectif extérieure, lorsque la valeur du paramètre étudié augmente, les valeurs  $U_{loss}$  et  $U_{eq}$  augmentent tandis que la valeur  $U_{use}$  diminue.

(4) Lorsque le débit d'air augmente, les valeurs  $U_{loss}$  et  $U_{use}$  augmentent tandis que la valeur  $U_{eq}$  diminue.

(5) La valeur  $U_{eq}$  pourrait atteindre la valeur la plus basse en mettant le revêtement Low-E sur la surface de la fenêtre extérieure qui fait face au canal de circulation d'air. De plus, une diminution de l'émissivité de la surface peut aider à réduire la valeur  $U_{eq}$  des fenêtres de soufflage étudiées.

(6) Pour la valeur  $U_{loss}$ , la valeur  $U_{use}$  et la valeur  $U_{eq}$  de VW1, les paramètres les plus sensibles sont respectivement le débit d'air et le coefficient de transfert convectif interne. Pour VW2, toutes les valeurs  $U_{loss}$ ,  $U_{use}$  et  $U_{eq}$  présentent une sensibilité élevée au débit d'air. Pour la valeur  $U_{loss}$ , la valeur  $U_{use}$  et la valeur  $U_{eq}$  de VW3, les paramètres les plus sensibles sont respectivement la surface de la fenêtre, le débit d'air et l'émissivité de la surface.

Les principales conclusions des calculs de régression sont résumées comme suit :

(1) Les modèles RFR, ETR, GBR et XGR sont plus performants que le modèle MLR avec des MASE, RMSE, NMAE et NRMSE inférieurs et un R2 supérieur. Cela montre leur potentiel d'application dans le calcul des U-valeurs dynamiques en tant qu'un outil facile à utiliser. En outre, le modèle GBR est légèrement plus performant que les modèles RFR, ETR et GBR.

(2) La taille du jeu de données est un impact important sur les performances des modèles SVR, KNN, RFR, ETR, GBR et XGBR. Cela indique qu'il est nécessaire de prendre en compte la taille du jeu données dans la sélection d'un modèle de régression approprié.

Les principales conclusions de l'identification inverse sont résumées comme suit :

(1) La contrainte aux limite inférieure du débit d'air dans les scénarios incertains était plus élevée que celle du scénario déterministe. Cela signifie que le cadre d'identification inverse composé d'incertitudes peut contribuer à améliorer la robustesse des double-fenêtres rénovées en mode insufflation en réponse aux changements des conditions aux limites.

(2) Une plus grande valeur des contraintes aux limites inférieures a été trouvée pour une plus grande magnitude d'incertitude.