

Défauts de conception et d'étanchéité à l'air des réseaux de gaines: étude de cas d'un reconditionnement de système de ventilation d'un ouvrage spécifique confiné et non doté d'ouvrant

Fabrice Richieri¹, Bassam Moujalled², Sandrine Charrier³, Adeline Mollard⁴, François Araque⁴

¹ SNIA - Rue 12 avenue Pythagore - BP 70285 - 33697 MERIGNAC CEDEX - France

*Corresponding and presenting author:
fabrice.richieri@aviation-civile.gouv.fr

² CEREMA/DTerCE/DCAP/UPERBAT - 46, rue St Théobald - BP 128 - 38081 L'Isle d'Abeau Cedex - France

³ SNIA/Département spécialisé Bâtiment - 210 rue d'Allemagne - BP 606 - 69125 Lyon Saint-Exupéry Aéroport - France

⁴ SNIA/Département spécialisé Bâtiment - 82 rue des Pyrénées - 75970 PARIS CEDEX 20 - France

RESUME

Le cas abordé dans notre article concerne un grand bâtiment atypique occupé par des travailleurs dont l'enveloppe est à la fois étanche à l'air, et sans fenêtre ni ouverture sur l'extérieur. Dans ces conditions de travail, la maîtrise du bon fonctionnement de la ventilation mécanique par insufflation d'air pour une bonne qualité de l'air intérieure est vitale. Nous présentons le cas d'une opération de travaux correctifs qui fait suite à une précédente rénovation globale présentant des difficultés pour maintenir une bonne qualité de l'air intérieur dans certaines parties du volume occupé, tout comme des nuisances sonores à proximité des locaux de CTA.

Une évaluation globale et complète des performances du système de ventilation du site (2 CTA, 2 réseaux de gaines et une centaine de bouches de soufflage) a été réalisée dans un premier temps par le SNIA (Service National d'ingénierie Aéroportuaire) appelé pour tenter d'améliorer la situation. Cette analyse a permis d'expliquer à la fois les médiocres performances constatées par le gestionnaire de l'infrastructure du système de ventilation en fonctionnement depuis seulement 4 années, tout comme les inconforts olfactifs dans certains locaux nettement sous-ventilés.

Cet article présente la méthode et les résultats basés sur une approche issue de mesures (pression et débit d'air dans les conduits, essais d'étanchéité à l'air des réseaux), re-calcul de pertes de charge théoriques de l'installation et observations (recherche de fuites) pour identifier les causes de ces dysfonctionnements.

Le diagnostic a montré que l'origine des problèmes était dû à la mauvaise performance des deux réseaux de ventilation d'alimentation (dualité fuites de gaines, et section insuffisante), avec un impact direct sur la pression de soufflage nécessaire en sortie de CTA, le long et en bout de réseau de gaines. Des mesures de reconditionnement ont été proposées par le SNIA qui a pris dès lors la maîtrise d'œuvre du projet dans le cadre d'un marché de travaux. Ce marché prévoyait notamment le remplacement de la quasi-totalité d'un des deux réseaux de gaines et de sa CTA simple flux de 2200 m³/h. Sur le second réseau de gaines, l'utilisation d'une solution d'étanchéification de conduit nommée Aeroseal® a ainsi que l'installation d'un variateur de vitesse sur le moto-ventilateur existant de la CTA (1900 m³/h) a été prévu au marché du lot en charge des travaux correctifs.

Cet article illustre également les résultats des essais de mise en service à la réception et durant l'année de garantie de parfait achèvement pour vérifier la globalité de l'installation, comprenant : mesures de pression de gaine en différents points, tests d'étanchéité à l'air de 100% des réseaux de gaines, mesures de débit d'air sur la totalité des bouches auto-régulées, relevés de consommation électrique des ventilateurs et niveau de pression sonore à proximité du local CTA.

KEYWORDS

Étanchéité à l'air, système de ventilation, conception des gaines, étanchéité des réseaux, commissionnement

Note: This paper was originally submitted in English and is available [here](#). The French version of the paper was provided by the authors at a later stage without being checked by AIVC.

1 INTRODUCTION

La ventilation est essentielle pour assurer une qualité de l'air acceptable dans chaque bâtiment en diluant ou en éliminant les polluants intérieurs. Dans le même temps, elle représente 30% ou plus de la demande d'énergie de conditionnement de l'espace (Liddament, 1996). Les normes de ventilation et les réglementations relatives aux conditions de travail définissent les exigences relatives aux taux de ventilation minimum. Les besoins de ventilation dans des locaux de travail spécifiques (ex: Laboratoires, salles blanches, locaux de process, ...) car non dotés d'ouvertures vitrées sur l'extérieur sont obtenus en général par des moyens mécaniques afin de respecter les débits d'air minimum définis au code du travail, l'éventuelle surpression nécessaire du bâtiment selon le besoin, un traitement de l'air neuf par filtrage, chauffage / refroidissement et éventuelle déshumidification. Les accès à ces espaces se font en général via un ensemble de sas pressurisés pour garantir l'étanchéité de l'ensemble et l'intégrité des lieux. Le système de ventilation doit pouvoir assurer un débit d'air minimum supérieur à une limite réglementaire définie en fonction du nombre d'occupants dans chaque pièce. Dans le même temps, des débits d'air stables sont parfois recommandés afin d'induire une surpression constante de l'ensemble du volume. A l'intérieur de ces espaces fermés, les conditions de qualité de l'air comme l'éclairage ou le confort thermique sont importantes car le travail sans accès à la lumière naturelle ni à des ouvertures peut être pénible et nécessite donc un haut niveau d'attention. En conséquence, des conditions confortables doivent pouvoir être garanties tout le temps.

Dans cet article, nous présentons le cas d'un ouvrage spécifique situé en France et qui présente de nombreuses difficultés pour maintenir de bonnes conditions de qualité de l'air intérieur après une rénovation complète des réseaux de gaines en 2012. Une évaluation des performances des réseaux et des Centrales de Traitement d'Air a été réalisée par la SNIA qui fut désignée maître d'œuvre de l'opération de remise en fonctionnement du système de ventilation.

2 METHODOLOGIE

Une mauvaise performance du système de traitement de l'air fut constatée par le gestionnaire du site à l'issue de l'installation progressive des différents services occupants sur le site qui suivit une longue période de rénovation réalisée en 2012. Les phénomènes les plus gênants de point de vue qualité de l'air intérieur se situaient alors dans les zones les plus distantes des deux centrales de traitement d'air fonctionnant en soufflage seul.

A partir de 2016, après plusieurs mois d'incertitude quant aux raisons de ces dysfonctionnements et plaintes, le gestionnaire du site a sollicité le Département Ingénierie Bâtiment du SNIA pour comprendre l'origine des défauts du système de ventilation et proposer des travaux d'amélioration. La démarche menée par le SNIA suivait alors les étapes suivantes:

1. Un audit complet du système de ventilation existant et de ses défauts ;
2. Le redimensionnement du système de ventilation tenant compte de l'occupation réelle des locaux après échanges avec le gestionnaire du site ;
3. La rédaction d'un marché de travaux pour la mise à niveau de tout ou partie du système de traitement et de distribution d'air neuf ;
4. Le suivi des travaux réalisés par une entreprise en métropole suivant le CCTP de l'opération ;
5. La mise en service et réglage des différents systèmes dont un ensemble d'essais et vérifications de la performance des installations.

Cet article présente à la fois les résultats de l'audit du système de ventilation basé sur une approche mêlant mesures (pression et débit d'air dans le réseau, pression du bâtiment), observations (recherche de fuites de conduits, circulation d'air entre locaux), ainsi que l'identification des causes principales de dysfonctionnements de l'installation.

3 DESCRIPTION DU BÂTIMENT

3.1 Compartimentage des locaux

Le bâtiment de travail se compose d'un seul niveau et a été mis en service en 2012 après une longue période de rénovation comprenant notamment la reprise du système de ventilation et de désenfumage, ainsi que la réfection du chauffage et de climatisation des pièces occupées et des locaux techniques. En raison de ses particularités, l'abri dispose d'un système de sécurité incendie adapté. Le site est ainsi divisé en deux zones de compartimentage que nous appellerons zones A et B, avec cinq subdivisions locales (A1, A2, A3, B1, B2) pour le désenfumage. Les limites de ces zones sont composées de cloisonnements coupe-feu et de clapets coupe-feu à chaque franchissement par le réseau de gaine de ces parois.

3.2 Description des systems CVC

Chauffage et refroidissement des locaux

Les pièces occupées (cuisine, bureaux, locaux repos...) sont équipées de ventilo-convecteur 4 tubes avec contrôle local de la température intérieure. Certains locaux techniques sont refroidis par armoires de climatisation.

Système de ventilation hygiénique

Le renouvellement de l'air repose sur une ventilation mécanique simple flux par insufflation assurée par deux CTA situées dans un local dédié. Les gaines de soufflage sont utilisées pour véhiculer l'air puisé à l'extérieur vers chaque pièce du site via deux réseaux de gaines dédiés au soufflage (Zone A et B) comme représenté sur la figure suivante. Ces gaines sont en acier galvanisé rectangulaires pour les débits importants, puis circulaires à partir du diamètre 250 mm en milieu et fin de réseau.

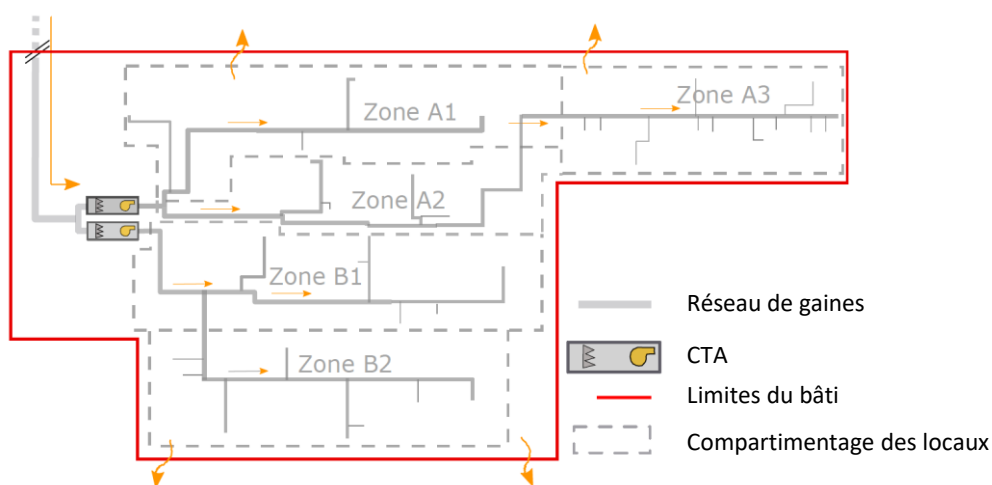


Figure 1: Schémas de principe ventilation hygiénique

Les deux CTA existantes sont identiques, munies de batteries froides fonctionnant sur eau glacée, et d'une batterie électrique pour le chauffage et la déshumidification de l'air. Un automate programmable actionne les vannes d'eau glacée et vannes de puissance d'un triac

pour contrôler la température neutre et l'hygrométrie de soufflage de l'air neuf en sortie des CTA. L'air neuf est ensuite insufflé dans chaque local par des diffuseurs dont le débit est régulé par des modules autorégulants. L'air, après insufflation dans chaque pièce, s'exfiltre vers les couloirs où sont situés des ouvertures d'échappement libre pour maintenir une surpression du site.

Table 1: Caractéristiques des CTA des zones A et B

Désignation	Equipements	Batteries Ch/Fr	Débit nominal
CTA n°1 (Zone A)	CTA (2-tubes/ 2 files)	Puissance chauffage : 27 kW elec Puissance de refroidissement: 11 kW	1800 m ³ /h
CTA n°2 (Zone B)	CTA (2-tubes/ 2 files)	Puissance chauffage : 27 kW elec Puissance de refroidissement: 11 kW	1800 m ³ /h

3.3 Constats avant audit - Qualité de l'air intérieur

Conformément au code du travail, le gestionnaire du site fait réaliser régulièrement des campagnes de mesure de qualité de l'air intérieure en différents points du bâtiment. Les mesures reposent sur des mesures ciblées de polluants liés à l'occupation des locaux ou polluants de combustion (CO₂), et des polluants liés aux produits de construction (COV totaux). Les résultats des campagnes de mesures sont illustrés par les figures suivantes.

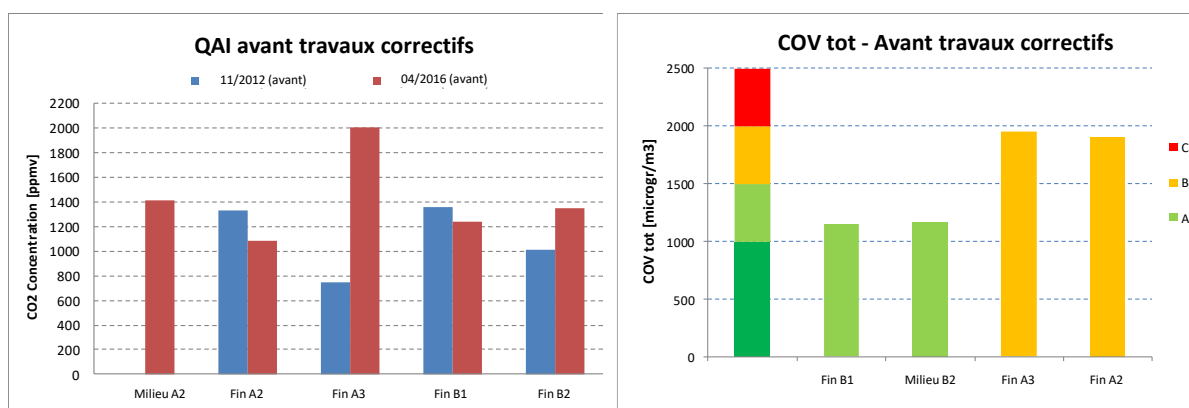


Figure 2: Mesures de CO₂ et COV dans certaines zones avant travaux

Les mesures de CO₂ entre 2012 et 2016 ont montré des seuils supérieurs à 1000 ppmv et parfois plus atteignant près de 2000 ppmv en 2016 dans les locaux de la zone A3 la plus éloignée du local CTA. Il est à noter que cette zone A3 n'était pas occupée en 2012 lors de la campagne de mesure, ce qui se traduit par un seuil bas en l'absence de présence humaine.

Les mesures de COV totaux ont été réalisées à l'issue des travaux de rénovation en 2012. Les niveaux sont comparés avec les seuils définis dans l'arrêté du 19 avril 2011 sur les émissions de polluants des matériaux à 28 jours. Là encore, les mesures ont montré que la branche de réseau desservant la fin de zone A3 et toute la zone A3 présentaient des problèmes de renouvellement d'air et de concentration en polluant assez élevées. Une recherche des sources de pollutions spécifiques a également été effectuée pour détailler quels étaient les COV majoritaires. Toutefois, la présence d'une concentration en COV totaux importante croisée avec des niveaux élevés de CO₂ était alors le signe d'une sous-ventilation des locaux, justifiant la demande d'intervention du SNIA.

4 AUDIT DES RESEAUX DE VENTILATION

4.1 Mesure de pression et débit d'air dans les réseaux

Le gestionnaire a dans un premier temps fait réaliser par ses services, puis par le concepteur initial de l'installation, des mesures de débit d'air soufflé pièce par pièce pour vérifier le respect des seuils de ventilation exigés initialement dans le cahier des charges de l'opération de travaux en 2012. Les résultats de cette campagne de mesure synthétisés par zone sont rassemblés dans la figure suivante.

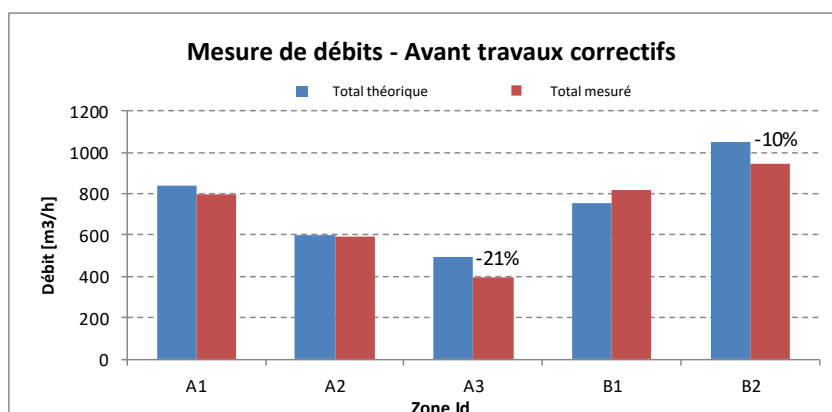


Figure 3: Comparaison initiale entre débits de ventilation mesurés et débits réglementaires pour 5 grandes zones (après la rénovation de 2012, avant travaux correctifs de 2017)

Comme nous pouvons le constater, la zone A3 la plus éloignée des CTA présentent une sous-ventilation globale de l'ordre de -21% de moins que l'objectif du cahier des charges travaux, avec localement de -30 à -70% de débit d'air en moins que l'objectif alors basé sur 15 m³/h/personne, seuil inférieur au code du travail.

La ventilation de la zone B est en comparaison meilleure, bien qu'en moyenne inférieure de 10% à l'objectif sur la zone B2 la plus éloignée des CTA, et avec localement de -13 à -53% de débit d'air inférieur à l'objectif initial.

Des mesures de débit d'air ont également été réalisées en sortie de chaque CTA, et comparées à la somme des débits des bouches de soufflage. Les résultats nous paraissent surprenants dans un premier temps car nettement supérieur dans les deux cas à l'objectif de ventilation du site. Toutefois, l'écart avec la somme des débits des bouches était de +31% dans le cas de la zone A et +16% dans le cas de la zone B, laissant augurer un taux de fuite très important. Ceci a été confirmé par les mesures d'étanchéité à l'air des réseaux réalisées dans la foulée. L'incertitude de mesures au cône + fil chaud est toutefois estimée à +/-20% pour des bouches à effet Coanda (source guide Promevent), incertitude qu'il convient de garder en mémoire.

De plus, il est constaté une chute très rapide de la pression en gaine avec près de -95 Pa de pertes de pression statique en gaine entre la sortie de la CTA et le premier clapet coupe-feu. Le débit en sortie de CTA de la zone A, de 2600 m³/h au lieu de 1935 m³/h occasionne des vitesses élevées et bruyantes en gaine avec plus de 6.5 à 7 m/s, augurant des pertes de charges singulières élevées au niveau de chaque clapet coupe-feu, coudes et pièces de transformation. Le tableau suivant regroupe les principales mesures sur ces deux réseaux.

Table 2: Measurement before retrofitting

Mesure avant travaux correctifs	Zone A	Zone B
Pression de soufflage CTA	280 Pa	313 Pa
Pression statique en gaine couloir (sortie local CTA après CCF)	185 Pa	245 Pa
Débit sortie CTA	2600 m³/h	2101 m³/h
Somme débits des bouches	1783 m³/h	1765 m³/h
Différence (débit de fuites et % de fuite)	817 m³/h (+31%)	336 m³/h (+16%)

4.2 Mesures d'étanchéité à l'air des réseaux et recherche de fuites

Au-delà du constat de sous-ventilation des locaux les plus éloignés, le SNIA a souhaité confirmer ces premières déductions par une campagne de mesure d'étanchéité à l'air des réseaux A et B. L'évaluation de la classe d'étanchéité à l'air a été réalisée par la société MapClim, suivant la norme NF EN 12237 et FD E51-767. Les résultats illustrés sur le graphique suivant confirment que les réseaux sont fuyards avec deux réseaux considérés comme « hors classe ».

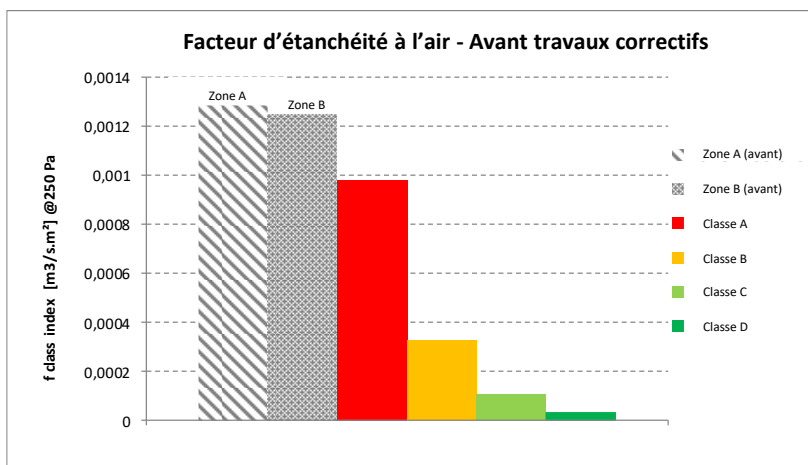


Figure 4: Evaluation de la classe d'étanchéité à l'air des réseaux avant travaux correctifs sur les réseaux A et B

La recherche de fuite réalisée sur le réseau de gaines durant les essais de pression a permis d'identifier des défauts importants au niveau de chaque piquage express, malgré la présence de mastic.

De nombreuses portions de conduits se sont révélées mal traitées ou mal supportées, avec également des difficultés d'exécution au niveau de raccords entre brides et au niveau de chaque clapet coupe-feu.



Figures 5: Exemples de fuites trouvées pendant les essais

4.3 Conclusion

Les investigations croisées entre mesures de débit, mesures de pression en gaine, et évaluation de la classe d'étanchéité à l'air des réseaux ont montré à la fois une mauvaise exécution des

travaux initiaux avec près de 30% de débit de fuite, ainsi qu'un sous-dimensionnement des sections de gaine qui engendrent des pertes de charge élevées, aboutissant alors à une chute de la pression statique rapide le long du réseau.

5 TRAVAUX CORRECTIFS REALISES

Le projet de rénovation du système de ventilation a consisté tout d'abord à mettre en cohérence les effectifs de chaque pièce en conformité avec le code du travail (Article R4222 -6), passant de 15 m³/h à 25 m³/h par personne. Le débit global mentionné au niveau du cahier des charges de l'entreprise en charge des travaux correctifs est ainsi passé de 1935 m³/h à 2130 m³/h (+10%) pour la zone A, et de 1755 m³/h à 1905 m³/h (+8,5%) pour la zone B.

Dans un second temps, le SNIA a procédé à une vérification des sections et passage de gaines adaptés au nouveau besoin, avec un objectif de limiter les pertes de charge linéaires à moins de 1 Pa/m.

Le schéma de principe des 2 réseaux illustré en suivant présente les portions de réseau de gaines:

- (en bleu) remplacées car sous-dimensionnées avec l'installation de modules de régulation automatiques et réglables manuellement en cas d'évolution ultérieure du besoin, avec une plage de fonctionnement comprise en 50 et 250 Pa pour 5% de précision sur le contrôle du débit ;
- (en vert) conservées (mais intégralement contrôlées) au niveau des modules de régulation, et étanchéifiées par le procédé d'étanchéification AeroSeal® appliqué par MapClim;

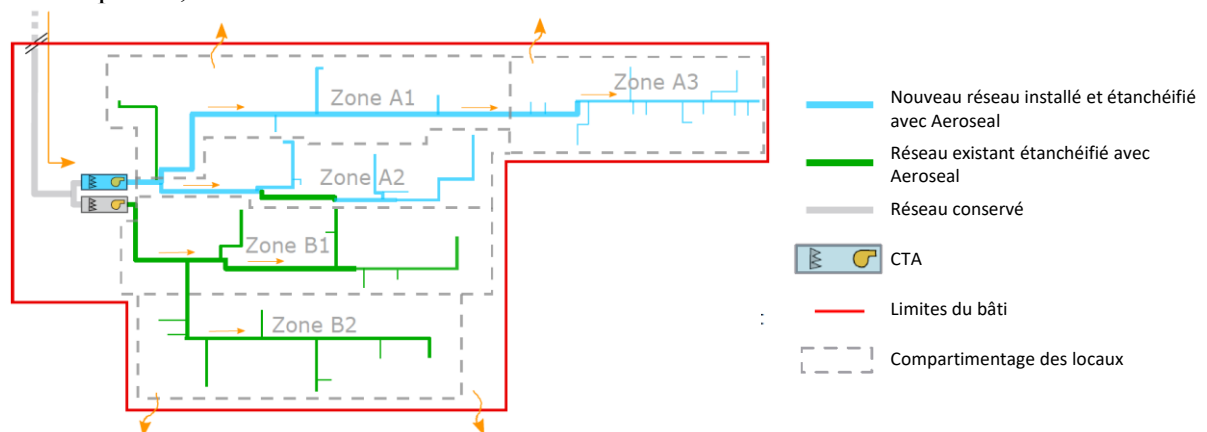


Figure 6: Portions de réseau conservées et remplacées

Le cheminement est globalement conservé hormis pour le réseau de la zone A1 qui est prolongé vers la zone A3, et une portion conservée du réseau en zone A2 car difficilement accessible. Le cahier des charges travaux mentionnait également un objectif de classe B sur l'intégralité des réseaux, aussi bien pour les réseaux neufs, que pour les portions étanchéifiées après nettoyage/désinfection. Les clapets coupe-feu du réseau A ont également tous été remplacés avec pour principale caractéristique une très nette réduction des pertes de charge singulière (< 10 Pa par clapet).

La CTA de la zone A a été remplacée avec la prise en compte:

- d'une variation de vitesse par maintien de pression de soufflage constant avec ventilateur EC;
- d'une pression disponible adaptée, ainsi qu'à la mise en surpression ultérieure du site;
- une amélioration de la supervision à distance de l'équipement sur GTB;
- l'installation d'un piège à son en sortie de CTA;

La CTA de la zone B a, quant à elle, été conservée avec l'installation d'un variateur de fréquence pour réduire la pression de soufflage devenue excessive à l'issue des travaux d'étanchéification.

6 RESULTATS APRES TRAVAUX

6.1 Mesures de pression en gaine et débits d'air

Des mesures de débit ont été réalisées à réception des travaux en 2017 sur l'intégralité du réseau par une société indépendante de l'entreprise de travaux. Les résultats par zone sont désormais conformes à l'objectif du cahier des charges en tout point du bâtiment.

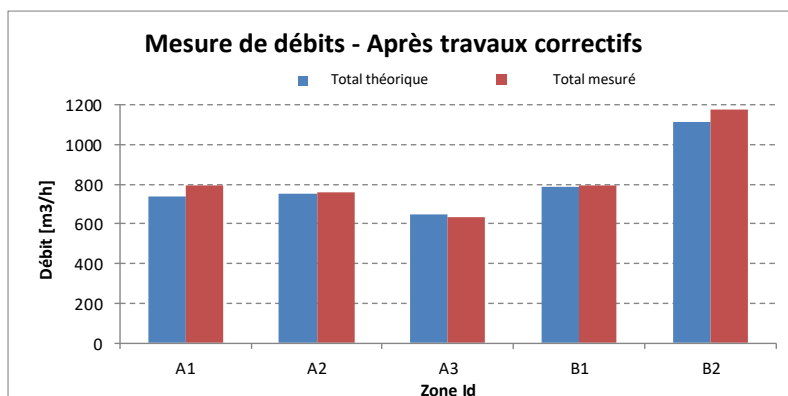


Figure 7: Comparaison après entre débits de ventilation mesurés et débits objectifs réglementaires pour les 5 grandes zones (après travaux correctifs de 2017)

La pression de soufflage est désormais plus élevée en tête de réseau avec une pression de soufflage de +350 Pa, qui correspond à la pression nécessaire pour maintenir un minimum de +80 Pa en gaine en amont du dernier module de régulation de la bouche la plus éloignée en zone A3. Cette pression est ainsi conforme aux prévisions de calcul théorique de pertes de charge pour cette excellente étanchéité à l'air visée en classe B. Enfin, l'écart avec la somme des débits des bouches n'est ici plus que de +4% dans le cas de la zone A et +6 % dans le cas de la zone B, laissant augurer une nette amélioration du taux de fuite.

Table 3: Mesures après travaux correctifs

Mesures après travaux correctifs	Zone A	Zone B
Pression de soufflage CTA	350 Pa	275 Pa
Pression statique en gaine couloir (sortie local CTA après CCF)	280 Pa	200 Pa
Débit sortie CTA	2293 m ³ /h	2095 m ³ /h
Somme débits des bouches	2190 m ³ /h	1968 m ³ /h
Différence (débit de fuites)	103 m ³ /h (+4%)	127 m ³ /h (+6%)

6.2 Etanchéification des réseaux de gaines via le procédé AeroSeal® appliqué par MapClim et classe d'étanchéité atteinte

Les résultats illustrés sur le graphique suivant indiquent que les réseaux sont désormais très étanches à l'air, avec un objectif respecté avec une classe D pour le réseau neuf de la zone A, et une classe C pour le réseau étanchéifié de la zone B. Les mesures ont été réalisées sur 100% des conduits (rigides + souple) et en une seule passe compte tenue de l'étanchéité de l'ensemble.

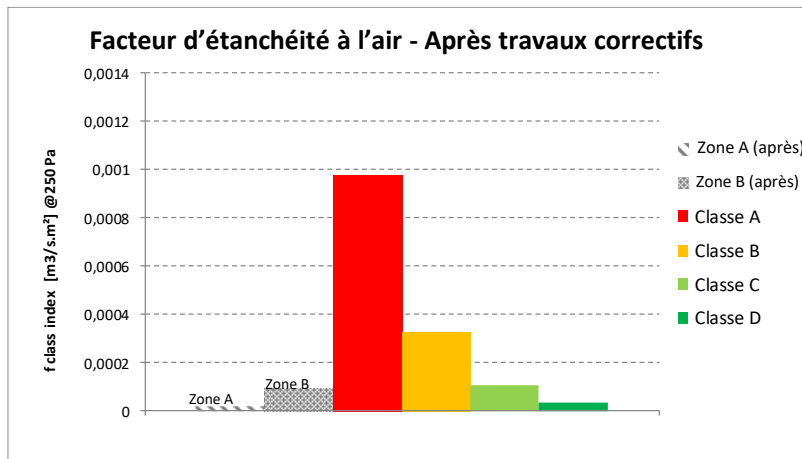


Figure 8: Mesures d'étanchéité à l'air après travaux correctifs sur les réseaux A et B

6.3 Qualité de l'air intérieur

Les campagnes de mesure des concentrations en COV n'ont pas eu lieu au moment de la rédaction de l'article. Les mesures de CO₂ réalisées à l'issue des travaux ont cependant montré des valeurs homogènes, avec seuils inférieurs à 700 ppmv, signe d'une ventilation homogène de chaque zone.

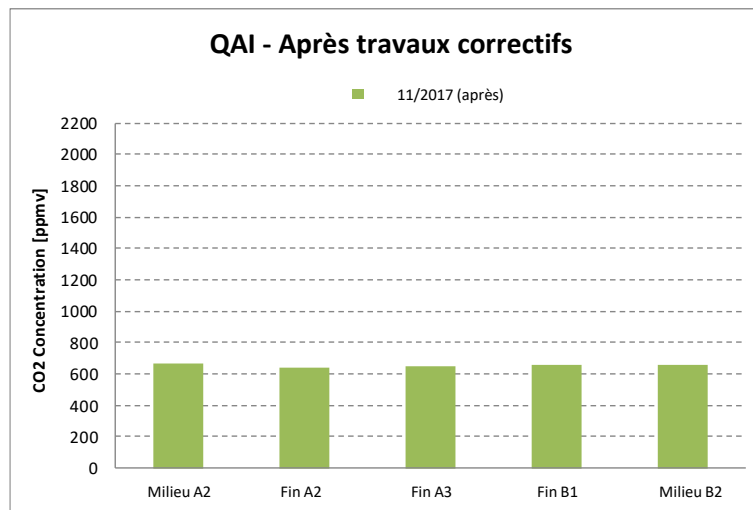


Figure 9: Mesures de CO2 après travaux correctifs de 2017

6.4 Consommation électrique des ventilateurs de CTA

L'installation d'une variation de vitesse sur chaque CTA a permis une réduction inattendue et appréciée du gestionnaire du site de la puissance absorbée par chaque ventilateur de 71% pour la CTA de la zone A et de 78% pour la zone B. Compte tenu du fonctionnement H24 des deux CTA, l'économie réalisée sera d'autant plus intéressante.

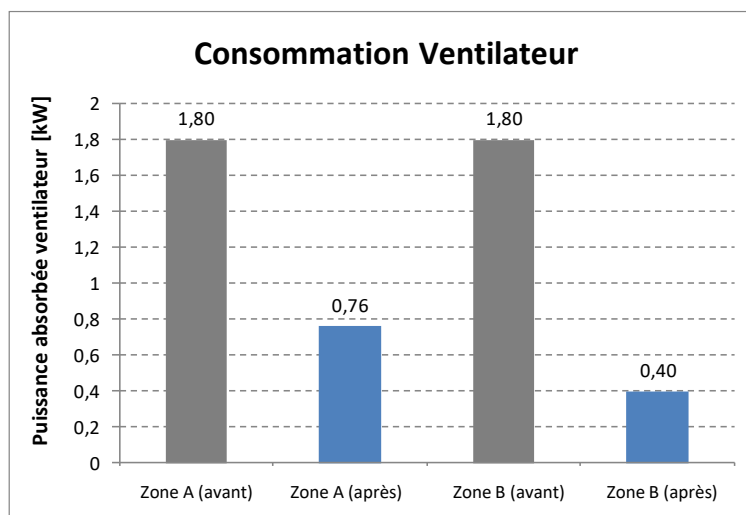


Figure 10: Comparaison des puissances absorbées des ventilateurs de chaque CTA avant et après travaux correctifs

7 CONCLUSIONS

La méthode appliquée à l'identification des dysfonctionnements d'une installation de ventilation d'un bâtiment étanche et non doté d'ouvrants pour l'aération manuelle a permis d'identifier précisément les causes de dysfonctionnement de la ventilation après plusieurs mois d'incertitude pour le gestionnaire du site.

Le diagnostic a montré que le problème majeur était dû à la mauvaise exécution de l'étanchéité à l'air des deux réseaux de gaines dont aucunes vérifications à l'exécution des travaux n'avaient été exigées précédemment, ainsi que le sous-dimensionnement sur plusieurs sections. Des mesures de reconditionnement proposées par le SNIA ainsi que des travaux bien réalisés ont permis de livrer une installation fonctionnelle, avec un contrôle vérifié de l'ensemble des débits et pression en gaine en différents points. Ce fonctionnement cohérent s'est également accompagné d'une nette réduction des puissances électrique absorbées par les ventilateurs, tout comme la réduction des nuisances sonores à proximité des CTA.

8 REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par la Direction Générale de l'Aviation Civile

9 REFERENCES

- Liddament M. (1996). A Guide to Energy-Efficient Ventilation. AIVC. March 1996
- AFNOR (2010), Fascicule documentaire FD E 51 767: Ventilation des bâtiments - Mesures d'étanchéité à l'air des réseaux, (Paris, 2010)
- F. Richieri, B. Moujalled, T. Salem & F.R. Carrié (2016): Airtightness impact on energy needs and airflow pattern: a numerical evaluation for mechanically ventilated dwellings in France, International Journal of Ventilation, DOI: 10.1080/14733315.2016.1203608
- French labour code (1984) - Code du travail, Chapitre II : Aération et assainissement - Article R4222-13 - Décrets 841093 et 841094 du 07 décembre 1984
- Promevent (2017) - Rapport technique - Évaluation des incertitudes de mesure de débit aux bouches, septembre 2017
- AFNOR (2003) – NF EN 12237 Standard - Ventilation des bâtiments - Réseau de conduits - Résistance et étanchéité des conduits circulaires en tôle
- AFNOR (2017) - FD E51-767 - Mai 2017. Ventilation des bâtiments - Mesures d'étanchéité à l'air des réseaux

Legifrance (2011) - Arrêté du 19 avril 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils

CCH (2011) - Arrêté du 30 décembre 2011 portant règlement de sécurité pour la construction des immeubles de grande hauteur et leur protection contre les risques d'incendie et de panique