



Guide pratique sur la modulation des débits de ventilation dans le tertiaire

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Industrie, de l'Énergie et de l'Économie numérique et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr

Présentation de l'association air.h :

Dans le cadre des travaux de la future Nouvelle Réglementation Hygiène, six fabricants de systèmes et de composants de ventilation se sont regroupés pour créer l'association air.h (Air Réglementation Hygiène).

Régie par la loi du 1^{er} juillet 1901, l'association air.h a mené, depuis sa création en 2003, de nombreuses études en partenariat avec l'ADEME, l'ANR et le CSTB afin de faire progresser les métiers de la ventilation.

Les membres fondateurs de l'association ont choisi dès le départ de constituer un comité restreint afin de gagner en efficacité dans leur programme de travail et agir avec plus de rapidité et de précision dans les propositions qu'ils émettent. Pour autant, air.h vit en connexion régulière avec l'ensemble des acteurs français et européens spécialisés dans la ventilation et la qualité d'air intérieur pour valoriser leur métier.

Cette association participe également, en lien avec son syndicat (UNCLIMA) et les institutionnels, aux différents travaux visant à professionnaliser la filière ventilation et à réviser les réglementations vieillissantes sur l'hygiène.

L'association air.h s'est dotée des moyens humains et financiers nécessaires pour mener à bien plusieurs études, toujours en concertation avec les acteurs de la filière ventilation (institutionnels, laboratoires, maîtrise d'ouvrage, bureaux d'études...).

Guide pratique sur la modulation des débits de ventilation

Auteurs :

Martial Archenault (COFELY),

Pierre Barles (PBC),

Anne-Marie Bernard (ALLIE’AIR)

Nous remercions le comité de rédaction de l’association
air.h pour sa collaboration à l’ouvrage et notamment :

- Nicolas Dufour (ANJOS)

- Cécile Jouve (ATLANTIC)

- Damien Labaume (ALDES)

et Pierre Deroubaix (ADEME) pour son soutien technique
et financier.

1	Introduction	6
2	Présentation des systèmes existants	7
2.1	Introduction aux systèmes	7
2.2	Technologies : des capteurs à la GTC	7
2.3	Les systèmes de modulation	12
2.4	Systèmes existants sous Avis Technique (ATEC)	13
3	Economies d'énergie	19
3.1	Introduction	19
3.2	Occupation des locaux : un paramètre clé	20
3.3	Gains énergétiques prévisionnels liés à la modulation	22
3.4	Calcul thermique réglementaire « conventionnel » (RT) pour le neuf	27
3.5	Gains énergétiques obtenus sur site : comment les quantifier ?	32
3.6	Exemples de gains obtenus sur le terrain	33
4	Exemples de sites	36
4.1	Exemple de l'équipement en rénovation d'un amphithéâtre universitaire	36
4.2	Equipement en rénovation sur tribunal de grande instance de Créteil	40
4.3	Salle de restaurant scolaire.	43
4.4	Centre de kinesithérapie, salle de gymnastique	47
4.5	Centre de kinesithérapie, salle santé	50
4.6	Exemple de l'équipement en rénovation d'une salle de travail bibliothèque	52
4.7	Equipement en neuf sur salle de classe	55

5	La Conception	58
5.1	Zonage et définition des besoins	58
5.2	Dimensionnement	66
5.3	Exemples de dimensionnement	68
6	Démarches d'installation	73
6.1	L'équipement sur du neuf	73
6.2	L'équipement sur de l'existant	74
6.3	L'installation du matériel	75
7	La réception	83
8	Maintenance et entretien	84
8.1	L'entretien préconisé par les constructeurs de matériel avec Avis Technique	84
8.2	Le cas particulier des capteurs de CO ₂	85
9	ANNEXES	87
9.1	Annexe 1 : procédure d'essais des capteurs sur site	87

1 - Introduction

La modulation des débits de ventilation vise à fournir le débit de ventilation approprié au moment où il est nécessaire.

On ventile pour :

- Fournir l'air neuf hygiénique aux occupants
- Extraire les pollutions spécifiques dont l'humidité
- Réduire les odeurs...

On cherche donc à traiter différentes sources de pollutions qui ne sont pas constantes dans le temps. La modulation doit fournir une bonne adéquation entre la fourniture et le besoin pour permettre d'optimiser les déperditions énergétiques et améliorer le confort (ex : acoustique).

Selon les cas, on doit donc tout d'abord identifier le ou les capteurs appropriés aux sources de pollution que l'on traite.

2 - Présentation des systèmes existants

2.1 - Introduction aux systèmes

Un système de modulation des débits de ventilation inclut forcément plusieurs éléments spécifiques qui sont :

- Le capteur approprié aux sources rencontrées
- Une action sur un ou plusieurs éléments pilotant le débit d'air neuf (ventilateur, registre, bouche...), éventuellement couplée à une régulation plus générale ou une GTC
- Un système permettant de s'assurer que la modification et la régulation du débit seront correctes

On distingue notamment les systèmes monozones (desservant un seul local) des systèmes multizones (desservant plusieurs locaux).

De même, on distinguera les systèmes de ventilation pure (tout air neuf) des systèmes de conditionnement d'air qui assurent renouvellement d'air et maîtrise d'une température, voire d'une hygrométrie. Les chapitres suivants vont donc présenter les différents composants rencontrés et les systèmes complets qui en découlent. Attention un seul composant ne suffit pas à créer un système de modulation. C'est bien du fonctionnement d'ensemble qu'il faut juger.

2.2 - Technologies : des capteurs à la GTC

2.2.1 - Les capteurs

Les capteurs sont un des domaines où les technologies évoluent le plus et très rapidement. La miniaturisation des capteurs pousse toujours plus loin, des capteurs plus précis, de préférence sans recours à une alimentation électrique sont recherchés pour évoluer vers des technologies sans fil. Ce chapitre est donc susceptible de fortement évoluer dans les années à venir mais présente ce qui est couramment disponible sur le marché à la date de publication. Le capteur doit être approprié à la source de pollution traitée (cf. chapitre 5 conception)

2.2.1.1 - Les capteurs d'humidité

2.2.1.1.1 - Hygrostat

Ces capteurs sont utilisés depuis longtemps et stables, assez performants. Les capteurs capacitifs permettent généralement une erreur totale – linéarité, hystérésis, répétabilité – inférieure à 5% HR (à 20°C).

Au-delà, les capteurs à miroir présentent une très bonne précision et peu de dérive tant que le miroir n'est pas endommagé.



Sonde thermo-hygromètre avec datalogger enregistreur.



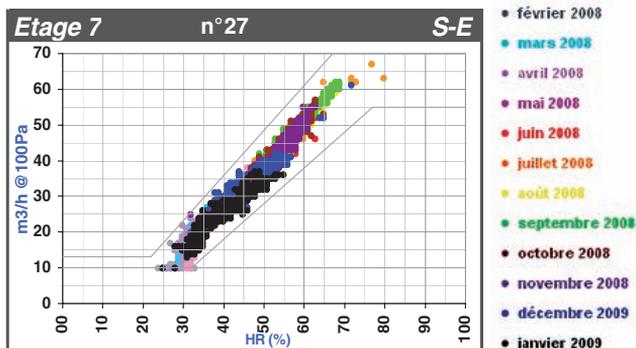
Transmetteur de pression différentielle pour asservissement de la ventilation.

2.2.1.1.2 - Composants hygoréglables

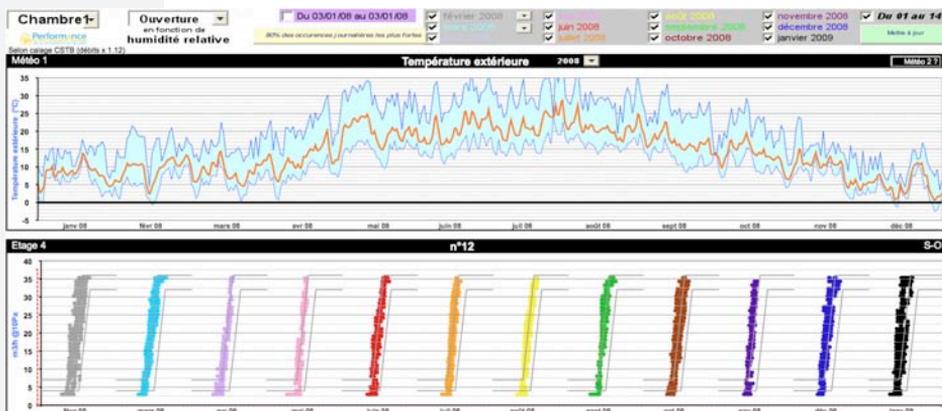
Les bouches et entrées d'air hygoréglables sont des composants dont la géométrie (ouverture) dépend de l'humidité. L'action est directement réalisée sur le volet par une tresse en tissu sensible à l'humidité de l'air. Il n'y a aucun report de signal électrique, c'est une action purement mécanique.

La courbe ci-dessous présente l'évolution du débit dans une bouche hygoréglable issue d'une étude sur site¹. On peut noter que le débit évolue bien en fonction de l'humidité dans le cadre prévu par l'avis technique et de manière proche de la courbe mesurée en laboratoire (en rose). On peut aussi remarquer que l'été, l'humidité est généralement plus élevée et la bouche plus ouverte tandis que l'hiver elle se ferme.

¹ "Projet Performance : amélioration et de l'étanchéité du bâti, par une démarche qualité, ADEME PREBAT, Savin, Bernard and al., AIVC Proceedings, Berlin, Sept 2009.



La courbe ci-dessous montre l'évolution du débit des entrées d'air hygro-réglables en fonction de l'humidité intérieure, sur l'année, présentée avec au dessus les courbes de températures extérieures (min, max et moyenne). On note que les entrées d'air ont en permanence fonctionné entre leur débit min et max, en fonction des besoins et des humidités intérieures rencontrées.



2.2.1.2 - Capteurs de CO₂

Différentes techniques existent parmi lesquelles on peut citer les capteurs chimiques, infrarouges ou acoustiques.

■ Les capteurs infrarouges :

Ce sont des capteurs de spectroscopie qui permettent de détecter le CO_2 dans un milieu gazeux par son absorption caractéristique.

Les principaux éléments constituant le système sont :

- une source infrarouge,
- un tube de lumière,
- une ingénierie (longueur d'onde),
- un filtre,
- un détecteur infrarouge.

Le gaz est pompé ou diffusé dans le tube de lumière. Par la suite, l'électronique mesure l'absorption de la longueur d'onde caractéristique de la lumière. Les capteurs les plus intéressants peuvent avoir une sensibilité de 20-50 ppm. Les développements récents des nanotechnologies comprennent l'utilisation de MEMS (Microelectromechanical Systems) pour faire baisser le coût de ces types de capteur, et pour créer des appareils plus petits.



Photographie de 3 capteurs de CO_2 montrant leur niveau d'intégration par micro technologies. Ce niveau d'intégration explique la fiabilité et la reproductibilité des capteurs, ainsi que la diminution de leur prix.

■ Les capteurs chimiques :

Ces capteurs sont constitués de couches sensibles à base de polymère ou heteropolysiloxane. Ceux-ci ont comme principal avantage d'avoir une consommation énergétique très faible et peuvent être réduit en taille pour les intégrer avec des systèmes micro-électroniques. L'inconvénient de ces capteurs est un risque de dérive à long terme ainsi qu'une durée de vie plutôt limitée. Ces éléments ont réduit leur usage par rapport au principe de mesure infrarouge.

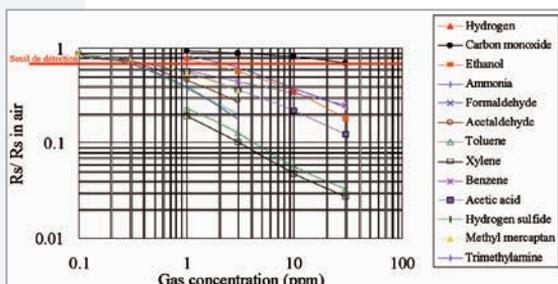
■ Les capteurs acoustiques :

Il existe également des capteurs acoustiques qui sont en cours de développement. Le principe de fonctionnement du capteur est d'utiliser la variation de la vitesse du son selon la masse moléculaire du milieu pour obtenir un capteur pouvant être fabriqué en masse à faible coût.

2.2.1.3 - Capteurs de COV



Les technologies utilisées pour les capteurs COV se rapprochent de celles utilisées pour les capteurs CO₂. On retrouve ainsi des capteurs chimiques dont le principe est d'utiliser un réactif qui permet de mesurer une concentration d'un composé donné. Des capteurs optiques sont également utilisés.



Les capteurs de COV souffrent d'un manque de spécificité et la réponse aux polluants reste incertaine. La figure suivante montre les différentes courbes de réponse d'un capteur de COV à des espèces chimiques variables. On constate le manque de spécificité de la réponse.

2.2.1.4 - Capteurs infrarouges de mouvement

Les capteurs infrarouges sont associés à des lentilles de Fresnel. Ils détectent les mouvements par une modification du flux thermique aux frontières de la projection des facettes des lentilles.

Leurs usages sont nombreux (alarmes, lumière, ventilation...) mais les capteurs employés doivent être suffisamment précis pour détecter des occupants parfois assis, bougeant peu. Une procédure d'essai est actuellement en cours pour les Avis Techniques mais d'autres sont envisageables.

L'objectif est de déterminer la zone de couverture sur laquelle le capteur est assez précis pour fonctionner.

Selon l'usage, cette précision peut varier. On emploie ces capteurs soit en détection de présence (tout ou rien), soit en détection du nombre de personnes présentes (un algorithme traduit les mouvements constatés en nombre d'occupants) ce qui ne requiert par la même précision. Par ailleurs, tous les capteurs ont un traitement électronique qui va par exemple éliminer les premières détections (pour éviter une fausse alarme) ou temporiser l'action...

2.2.2 - La variation de vitesse au ventilateur

La variation de vitesse au ventilateur est réalisée par différentes méthodes :

- Action sur un registre
- Variation de tension
- Variation de fréquence
- Moteurs à commutation électronique (EC)

Ces différentes actions donnent un résultat différent sur la possibilité réelle de baisser les débits et la consommation électrique des ventilateurs (cf. chapitre 5 conception)

2.2.3 - La régulation des débits

Deux grands modes existent :

- Les registres motorisés vont fonctionner entre un minimum et un maximum. Cependant faire varier l'ouverture d'un registre ne suffit pas à garantir un maintien du débit, c'est pourquoi on retrouve associé soit un pressostat permettant un maintien constant de la pression en un point du réseau (valable pour des petits et moyens réseaux dont aucun registre n'est trop éloigné du pressostat), soit des boîtes à débit variable (VAV) qui peuvent avoir une croix de mesure des débits intégrées et une régulation électronique adaptant l'ouverture au débit passant réellement.
- Les registres autoréglables lorsque la sélection des ventilateurs est associée à une courbe plate. Ils existent actuellement en bi-débit ou peuvent être employés en cas de régulation séquentielle (ON/OFF).



Registre en conduit, avec servomoteur intégré

2.3 - Les systèmes de modulation

2.3.1 - Les systèmes de ventilation monozones

Ces systèmes sont généralement constitués d'un ventilateur à vitesse variable, d'un capteur qui pilotera directement ce ventilateur. Le débit est réglé au ventilateur et se répartira dans le local traité selon le mode retenu d'équilibrage.

2.3.2 - Les systèmes de ventilation multizones

Le ventilateur dessert cette fois plusieurs zones, chacune ayant son capteur qui pilotera un registre asservi. Le ventilateur est muni d'une

vitesse variable et d'un pressostat. Si le choix d'un asservissement à pression constante est souvent fait, des régulations à pression variables peuvent aussi être envisagées pour optimiser la puissance électrique absorbée.

2.3.3 - Systèmes de conditionnement d'air monozones

Le système est composé d'une CTA avec un caisson de recyclage et une variation de vitesse, d'un registre d'air neuf motorisé et de plusieurs capteurs dans la zone traitée, notamment un représentant le besoin d'air neuf (donc généralement l'occupation) et l'autre la température. La régulation va donc devoir intégrer des fonctions :

- De gestion de la température (action sur les batteries, variation de vitesse de la CTA)
- De gestion de l'air neuf (action sur le registre d'air neuf, variation de vitesse)

Elle devra aussi gérer les priorités et les risques de conflits et éviter les fluctuations rapides de consigne (battements...)

2.3.4 - Systèmes de conditionnement d'air multizones

Le système est composé d'une CTA avec un caisson de recyclage et une variation de vitesse, d'un registre d'air neuf motorisé et de plusieurs capteurs dans chacune des zones traitées, notamment un représentant le besoin d'air neuf (donc généralement l'occupation) et l'autre la température par zone. L'action locale va être faite par un registre terminal dans chaque zone ou une boîte VAV. La régulation est beaucoup plus complexe que dans le cas précédent car elle doit gérer les priorités dans les zones et à la CTA. Il est essentiel de déterminer les débits mini et maxi par zone, ainsi que le taux d'air neuf mini et maxi.

2.4 - Systèmes existants sous Avis Technique (ATEC)

Aujourd'hui, plusieurs sociétés proposent des systèmes de modulation des débits de ventilation pour les bâtiments tertiaires, sous Avis Technique du CSTB.

Généralement, ces Avis Techniques (ATEC) concernent plusieurs systèmes d'une même famille, qui se différencient à la fois par le

type de détection (ex. capteur de CO₂, capteur de présence, etc.) et par le type d'action sur les débits (ex. action sur le ventilateur, action sur un registre, etc.).

L'objectif principal de ces systèmes est **d'adapter les débits de ventilation à l'occupation des locaux c'est-à-dire de ventiler en fonction des besoins locaux**, permettant ainsi un gain énergétique sur les déperditions par renouvellement d'air des locaux desservis.

C'est l'élément le plus important qui ressort des ATEC et qui se traduit par des valeurs (généralement tabulés en fonction de variantes du système) du coefficient Crdbnr (coefficient de réduction de débit pour les bâtiments non résidentiels) à introduire dans le calcul réglementaire de la RT.

Les systèmes sous ATEC sont donc principalement valorisés au travers de l'impact énergétique dans le cadre du calcul thermique réglementaire (cf. Chapitre 2.4.2).

En outre, dans les dossiers techniques établis par les demandeurs, d'autres avantages des systèmes de modulation des débits sont mis en avant :

- réduction de la consommation électrique des ventilateurs ;
- amélioration du confort thermique et de la QAI par une meilleure adaptation des débits aux besoins (pas de courants d'air, débits hygiéniques adaptés à des occupations variables, maintien d'un débit réduit -10% du nominal- en absence des occupants).

Les ATEC visent à garantir le fonctionnement global du système.

2.4.1 - Références des systèmes sous ATEC

La liste à jour des systèmes sous Avis Technique peut être consultée sur le site Internet du CSTB, à l'adresse suivante :

<http://www.cstb.fr/evaluations/atec-et-dta/rechercher-un-atec-ou-un-dta.html>

La recherche s'effectuant ensuite, par exemple via les mots clés « ventilation modulée », pour aboutir sur la famille de produits : « Systèmes de ventilation modulée pour les bâtiments tertiaires ».

Ces ATEC sont instruits par le Groupe Spécialisé (GS) n°14 : Installations de génie climatique et installations sanitaires.

2.4.2 - Principaux éléments des ATEC

Les ATEC évaluent l'ensemble du système, les différents composants, leur caractéristique, leur tenue dans le temps, leur fonctionnement et analyse ensuite l'impact en QAI et en énergie par rapport aux visées réglementaires. Sur l'aspect QAI, il a été convenu d'aller au-delà du niveau des règles d'hygiène, en maintenant un débit réduit de 10% hors occupation pour évacuer les autres pollutions (émissions des matériaux...) et purger les locaux.

2.4.2.1 - Domaine d'emploi accepté

Dans l'ensemble des ATEC des systèmes de ventilation modulée pour les bâtiments tertiaires, les locaux suivants sont concernés (à quelques variantes près) :

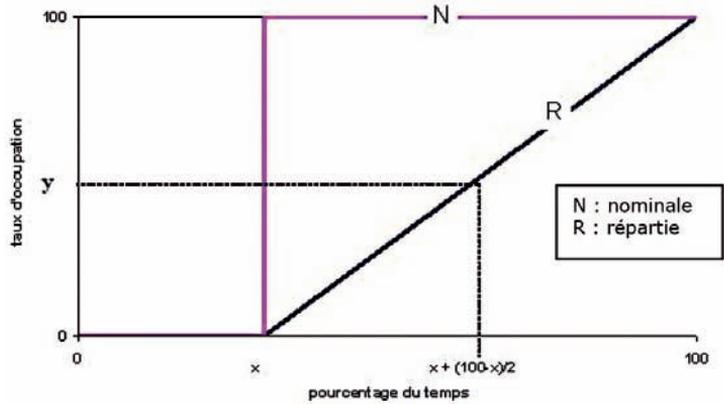
- salles de réunions
- bureaux de 1 à 3 personnes
- bureaux paysagers de plus de 3 personnes
- locaux d'enseignement primaire et secondaire
- locaux d'enseignement supérieur
- salles de restaurant
- cinémas
- autres locaux à occupation variable (sous réserve des règles d'utilisation et d'une pollution due à l'occupation humaine ; pas de pollution spécifique).

Pour chaque type de local, une occupation type a été définie en fonction d'études sur sites, de statistiques nationales... Avant de les généraliser, ces hypothèses ont été rendues fortement pessimistes, pour que les gains calculés soient sécuritaires.

Par exemple, un bureau de moins de 3 personnes ou un établissement d'enseignement primaire est jugé occupé de manière nominale (N dans le schéma) par 100% de ses occupants et inoccupé pendant 40% du temps. Une étude sur les bureaux avait montré une inoccupation bien plus forte (60%) et le taux d'inoccupation des écoles est logique

par rapport aux emplois du temps mais ne prend pas en compte, les absences, les activités en sous groupes.....

Le tableau ci-dessous reprend les hypothèses d'occupation retenues pour le calcul du gain potentiel :



Local concerné	Type d'occupation (1)	Taux d'occupation (en temps) par rapport à l'horloge x (%)	Taux de fréquentation en occupation y (%)
Salles de réunion	R	50	50
bureaux ≤ 3 personnes*	N	40	100
bureaux paysagers > 3 personnes**	R	10	50
enseignement primaire et secondaire	N	40	100
enseignement supérieur	R	20	50
salle de restaurant**	R	0	50
salles des fêtes, salles de conférences, salles polyvalentes, amphithéâtres, d'un volume supérieur à 250 m ³	R	44	51
cinéma**	R	0	35
autres cas***		****	

(1) N : nominal
R : répartie

Les systèmes doivent ensuite faire preuve de leur capacité à réaliser ce gain potentiel pour calculer leur coefficient de réduction de débit en considérant :

- l'incertitude de leur capteur
- leur type de régulation
- le mode de régulation des débits

2.4.2.2 - Coefficient de réduction de débit

Chaque ATEC donne un tableau récapitulatif du coefficient de réduction de débit (Crdbnr) pour un Cdep de 1,3 (coefficient de dépassement pris en compte dans le calcul thermique règlementaire) en fonction du système et de la destination des locaux, et suivant les variantes en termes de détection et de type d'action sur les débits.

Pour les différents ATEC disponibles aujourd'hui, le tableau ci-après récapitule les ordres de grandeurs des coefficients Crdbnr en fonction des principales variantes : type de détection – type d'action.
(les précisions peuvent être obtenues en consultant les différents ATEC – cf. § 2.3.1)

Local concerné	Détection de présence		Détection de CO ₂	
	Action sur ventilateur	Action sur bouche ou registre	Action sur ventilateur	Action sur registre
Salle de réunion	0,60	0,55 à 0,60	0,36 à 0,37	0,29
Bureau ≤ 3p	0,68	0,68	0,59 à 0,61	0,55 à 0,57
Bureau paysager > 3 p	0,80	0,80	0,48 à 0,50	0,43 à 0,45
Enseignement primaire et secondaire	0,68	0,64	0,59 à 0,61	0,55 à 0,57
Enseignement supérieur	0,80	0,80	0,45 à 0,47	0,40 à 0,41
Salle de restaurant	0,80	0,80	0,51 à 0,53	0,47 à 0,49
Cinéma	0,80	0,80	0,39 à 0,40	0,32 à 0,33
Autres locaux	0,80	0,80	0,70	0,70

2.4.3 - Evolution des ATEC

Une évolution est en cours et devrait être opérationnelle prochainement pour rajouter certains types de locaux et de modulation, notamment sur l'humidité, comme en logements (chambres d'hôtels, foyers...) :

- 1- écoles maternelles, crèches, garderie
- 2- Chambres d'hôtel
- 3- Locaux assimilés à bureau (postes d'accueil, salles d'attente)
- 4- Locaux de vente
- 5- Locaux de restauration (salles de restauration, cafés, bars, cantines)
- 6- Locaux de réunion (salles de cinéma, salles de spectacle > 250 occupants)
- 7- Locaux à usage sportif

3.1 - Introduction

Moduler les débits de ventilation, c'est fournir le débit approprié au moment où il est nécessaire : air neuf hygiénique pour les occupants des bâtiments, évacuation des principaux polluants – humidité, odeurs....

Aujourd'hui, dans les bâtiments tertiaires, la ventilation est généralement arrêtée en dehors de l'occupation (ex. la nuit pour un bâtiment de bureaux), mais en période **d'occupation** (ex. le jour pour un bâtiment de bureaux), les taux d'occupation de certains locaux peuvent être très variables (ex. salle de réunion).

Il est non seulement utile d'apporter l'air hygiénique en quantité adaptée au nombre d'occupants d'un point de vue sanitaire (notamment d'avoir suffisamment de débit lorsque le taux d'occupation est important), mais aussi d'un **point de vue énergétique** car ces locaux sont chauffés en hiver et très souvent climatisés en été. En tertiaire, on trouve en outre de nombreux systèmes de conditionnement d'air, qui assurent en même temps le renouvellement d'air (ventilation hygiénique) et le chauffage/refroidissement des locaux desservis. Le débit d'air total est alors adapté aux besoins énergétiques, et il contient une part de débit d'air neuf qui peut être modulée en fonction de l'occupation. Ces systèmes de conditionnement d'air sont couramment appelés systèmes de chauffage ou de climatisation « tout air ».

La modulation des débits de ventilation permet de limiter les pertes de chaud ou de froid suivant la saison et de limiter corrélativement les consommations électriques des ventilateurs.

Evidemment, les gains obtenus seront d'autant plus importants que le taux d'occupation sera variable et que le débit total que l'on peut moduler sera important.

Voici quelques questions que l'on peut se poser quand on aborde la question énergétique vis-à-vis de la modulation des débits de ventilation :

- Gains prévisionnels ?
 - que peut-on attendre comme gains énergétiques ?
 - comment calculer ces gains, comment les évaluer à la conception ?
 - comment ces gains sont-ils valorisés dans les calculs thermiques réglementaires « conventionnels » ?
 - exemples de gains prévisionnels ?
- Gains obtenus ?
 - comment évaluer les gains obtenus sur des installations en œuvre ?
 - quelles consommations mesurer et comment ?
 - à quoi comparer pour définir un gain ?
 - exemples de gains obtenus ?
- Rentabilité ?
 - est-ce que la modulation de débits est rentable ? (cf. Chapitre 3.5 «Retours technico-économiques»)

3.2 - Occupation des locaux : un paramètre clé

L'occupation des locaux tertiaires peut être très variable en temps et en nombre de personnes. Or, elle est un paramètre clé dont dépend fortement le gain attendu des systèmes de modulation des débits de ventilation.

Différentes études ont montré quels étaient les taux d'occupation de nombreux locaux tertiaires et quels pouvaient être par conséquent les gains énergétiques envisageables par la mise en œuvre de systèmes de modulation des débits qui s'adapteraient à l'occupation de ces locaux.

Le tableau ci-dessous récapitule un certain nombre de ces études :

Année	Situation géographique	Type de bâtiment	Caire	Local étudié	Type de capteur	Capacité totale du local (occupants)	Nombre d'occupants moyen	Pourcentage d'occupation constaté (%)	Données complémentaires		
									Surface (m ²)	Volume (m ³)	HSP (m)
2005	Toulose	Ecole	Neuf	Salle de classe	proportionnel (agitation)	25	15	60%	60	167	2,8
2005	Ambérieu	Centre de réduction	Neuf	Salle de gym	proportionnel (CO2)	20	10	80%	90	380	4,0
2005	Ambérieu	Centre de réduction	Neuf	Salle de consultation	présence	2	2	80%	10	25	2,5
2005	Messimy	Ecole	Neuf	Centre	proportionnel (CO2)	50	40	80%	20	50	2,5
2005	St Etienne	Bibliothèque universitaire	Réhabilitation	Salle de réunion	présence	25	18,2	5%	60	150	2,5
2005	Créteil	Tribunal de grande instance de Créteil	Réhabilitation	Salle des assises	proportionnel (CO2)	150	30 à 40	30%	225	1843	8,2
2000	Villeurbanne	Bâtiment de bureaux (CETIA)	Existant	Salle de réunion	présence	10	43%	35%	-	-	-
2002	Divers	Etude sur 13 salles de réunions dans 10 sociétés	Existant	Salle de réunion	proportionnel (CO2)	30 assises / 60 debout	50%	8%	-	-	-
2002	Divers	Etude sur 18 bureaux individuels dans 10 sociétés	Existant	salle de réunion		6 à 25 pers...	48%	16%			
2002	Divers	Etude sur 18 bureaux individuels dans 10 sociétés	Existant	Bureaux individuels		1		40% (soit 4h/jour)			
2003	Saint Etienne	Université Jean MONNET à Saint-Etienne	Existant	Amphithéâtre de cours	proportionnel (CO2)	300	-	65%	238	934	3,9
2001-2002	Norvège - Oslo	Ecole	Expérimentation	157 salles de classe sur 81 écoles choisies au hasard à Oslo, en Norvège	proportionnel (CO2) Comptage (capteur infrarouge)	30	22	73%	-	-	-

*: il s'agit ici du gain thermique pour le chauffage de l'Amphi

Dans les calculs conventionnels prévisionnels réalisés pour les constructions neuves (calculs RT pour le neuf) des scénarios d'occupation de base sont pris en compte suivant les différentes typologies de bâtiments et d'usages (cf. § 3.3.1).

Dans l'existant, lors de l'évaluation des performances attendues par la mise en place de systèmes de modulation de débits, la connaissance des taux d'occupation « réels » des locaux permettra de montrer l'intérêt de tel ou tel système d'un point de vue technico-économique (cf. Chapitre 4).

3.3 - Gains énergétiques prévisionnels liés à la modulation

Choisir de mettre en œuvre une modulation de débits dans un projet, c'est être capable d'en montrer l'intérêt, d'abord d'un point de vue énergétique et ensuite d'un point de vue économique. Dans ce Chapitre, on s'intéresse à l'approche énergétique, le volet économique étant abordé au Chapitre 4, à partir de l'analyse des coûts des installations de modulation des débits.

Dans les paragraphes ci-après, on expose des méthodes de calculs permettant de prévoir les gains énergétiques liés à la modulation de débit : il s'agit de montrer, à la conception, l'intérêt énergétique de la modulation de débit.

Parallèlement, pour les projets neufs, le calcul thermique réglementaire « conventionnel » doit intégrer le système envisagé et permettre sa « valorisation » par comparaison avec d'autres solutions, en termes de consommation conventionnelle d'énergie primaire annuelle.

Si les gains énergétiques peuvent être appréciables dans le cas des locaux chauffés, ils sont en général faibles dans le cas des locaux climatisés.

3.3.1 - Calculs des gains pour les locaux chauffés

Comme tout calcul énergétique, il est conventionnel et correspond à une moyenne statistique sur le parc. Chaque site est différent et certaines études ont même montré que l'amélioration du confort en modulant les sites pouvait en augmenter la fréquentation.

Les gains énergétiques sont de deux ordres :

- gain sur les déperditions par renouvellement de l'air ;
- gain sur la consommation électrique des ventilateurs.

Ils peuvent être calculés en dynamique avec un scénario d'occupation ou obtenus rapidement par un calcul moyen.

3.3.1.1 - Consommation de chauffage liée au renouvellement d'air

En utilisant le nombre moyen d'heures d'occupation par jour, on peut calculer la consommation de chauffage liée au renouvellement d'air par une formule du type :

$$\text{Conso} = 0,34 \cdot b \cdot \text{DH} \cdot \text{Q}_{\text{moy}} \cdot \text{h}_{\text{moy}} / \text{rdt}$$

Avec :

- **b** : coefficient lié aux apports gratuits qui permet de corriger le calcul et de se rapprocher du besoin (b est généralement fixé à 0,5 en tertiaire, comme dans les calculs des Certificats d'Economies d'Energie - CEE) ; cela revient à considérer qu'une partie du chauffage des locaux - la moitié en l'occurrence - est assurée par les apports gratuits ; ce coefficient peut être calculé plus finement en prenant en compte notamment l'inertie du local, ses surfaces vitrées et leurs orientations, comme cela est décrit dans les anciennes règles de calculs Th-B ; les valeurs du coefficient b peuvent ainsi varier sensiblement en deçà et au delà de 0,5 ;

- **DH** : nombre de degrés-heures de chauffage sur l'année. La base retenue est celle correspondant à la température de consigne. Par exemple, pour une salle chauffée à 20 degrés, on ne prendra pas les degrés-heures base 18 mais les degrés-heures base 20. La conversion entre les deux est simple.

- **Q_{moy}** : le débit moyen en occupation (en m³/h) ;
- **h_{moy}** : le nombre moyen d'heures d'occupation dans la journée ;
- **rdt** : le rendement de génération de l'installation de chauffage (ex. 0,95 pour le chauffage électrique direct ; de l'ordre de 0,6 pour une installation de chauffage central, ancienne) sur boucle d'eau chaude alimentant une batterie de CTA.

A la place des degrés-heures annuels de chauffage, on peut également utiliser les degrés-jours annuels de chauffage, rapportés à la même base de température intérieure, dans ce cas, l'équation devient :

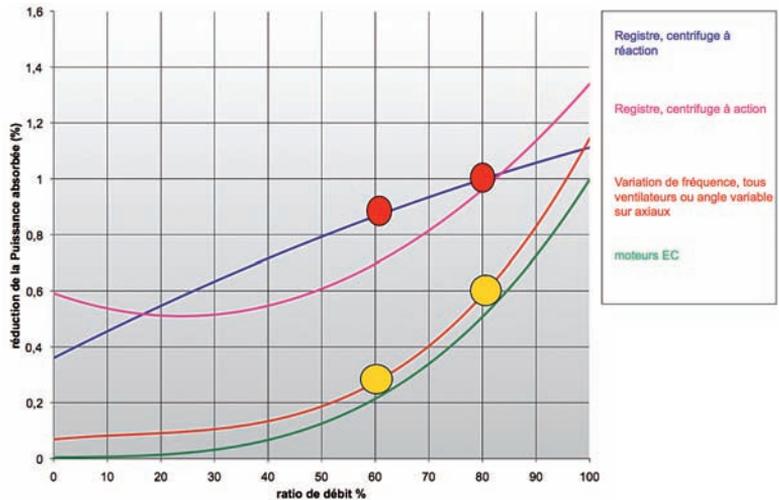
$$\text{Conso} = 0,34 \cdot b \cdot \text{DJ} \cdot \text{Q}_{\text{moy}} \cdot \text{h}_{\text{moy}} \cdot 24 / \text{rdt}$$

Le gain peut être estimé par rapport à un système à débit fixe en remplaçant le débit moyen par ce débit fixe et le nombre d'heures par celui d'occupation (souvent géré par horloge et fixé dans les règles Th-C).

Attention, si un débit minimum peut être maintenu pour traiter des émissions de matériaux par exemple, il faut en tenir compte dans le débit moyen.

3.3.2 - Consommation électrique des ventilateurs

La norme NF EN 14241 précise les gains attendus selon le type de régulation employée et le débit réel du ventilateur.



A titre d'exemple (en jaune), pour une modulation de débit par variation de vitesse du ventilateur (variateur de fréquence), à 60 % du débit nominal, la puissance absorbée par le moteur est équivalente à 30 % de la puissance nominale. La puissance double, soit 60 % de la puissance nominale, lorsqu'on passe de 60 % à 80 % du débit nominal.

Autre exemple (en rouge), pour une modulation de débit par action sur un registre centrifuge à action avec un ventilateur à réaction à 60 % du débit nominal, la puissance absorbée par le moteur est de 90 % de la puissance nominale, et elle passe à 100 % lorsque l'on passe de 60 % à 80 % du débit nominal.

3.3.3 - Exemples de gains

Le tableau ci dessous regroupe les gains en énergie finale obtenus en kWh/m²/an dans le calcul qui a été employé pour établir les certificats d'économies d'énergie (CEE). Ils dépendent de l'état initial et sont basés sur les durées d'occupation des règles thermiques en France.

Ventilation Modulée Présence tertiaire		
Secteur	Gain en kWh/m ² /an	
	Chauffage électrique	Chauffage combustible
Bureau < 1000 m ²	14	25
Bureau > 1000 m ²	13	24
Enseignement	34	47
Cinéma	109	158
Restaurant	10	22
Grandes salles	61	94
Etablissement sportif (hors piscine)	16	25
Autres locaux	19	33

Ventilation Modulée proportionnelle tertiaire		
Secteur	Gain en kWh/m ² /an	
	Chauffage électrique	Chauffage combustible
Bureau < 1000 m ²	17	31
Bureau > 1000 m ²	19	32
Enseignement	40	55
Cinéma	159	230
Restaurant	18	34
Grandes salles	89	136
Etablissement sportif (hors piscine)	23	36
Autres locaux	25	43

Note :

La situation de référence considérée pour estimer les gains de chacun des cas est la suivante :

- Bureaux < 1000m² : pas de système de ventilation.
- Bureaux > 1000 m² : situation moyenne entre l'absence de ventilation et le Double Flux sans échangeur.
- Enseignement : pas de système de ventilation.
- Cinéma, grandes salles, établissement sportif (hors piscine) : Double Flux sans échangeur.
- Restaurant : situation moyenne entre l'absence de ventilation et le Double Flux sans échangeur.
- Autres locaux : idem.

Les tableaux précédents peuvent également se traduire en pourcentage sur un système à débit fixe:

Secteur	Gain moyen en%	
	Ventilation Modulée présence	Ventilation Modulée proportionnelle
Bureau < 1000 m ²	53%	65%
Bureau > 1000 m ²	39%	54%
Enseignement	54%	64%
Cinéma	44%	64%
Restaurant	27%	45%
Grandes salles	44%	64%
Etablissement sportif (hors piscine)	44%	63%
Autres locaux	42%	55%

3.3.4 - Note relative aux gains pour les locaux climatisés

3.3.4.1 - Modulation et free cooling

En mi saison, il peut être intéressant de réduire les charges dans les locaux en faisant entrer dans les locaux de l'air extérieur, lorsque la température extérieure est inférieure à l'intérieure mais aussi lorsque l'humidité n'est pas

trop élevée. Ce rafraîchissement, dit « free cooling » peut alors se substituer à la modulation du débit hygiénique. Il devient de plus en plus important dans les bâtiments passifs et peut contribuer à réduire les surchauffes souvent constatées.

Si la modulation continue dans cette période, on peut perdre un peu en potentiel de rafraîchissement, bien que les charges soient souvent proportionnelles à l'occupation des locaux.

3.3.4.2 - Modulation et climatisation

Lorsque la climatisation est déclenchée, la modulation des débits hygiénique permet à nouveau des gains. Si une dérogation a été prise pour du free cooling, elle doit alors être arrêtée.

NB : Les gains d'été sont donc en général le bilan entre les périodes de climatisation et les périodes intermédiaires. Selon les choix faits, la modulation peut donc apporter peu en été si le nombre de jours de climatisation est réduit et les charges internes (donc le potentiel pour le free cooling) fortes.

Les gains en climatisation sont faibles car le nombre de degrés heures de rafraîchissement de l'air extérieur est faible.

3.4 - Calcul thermique règlementaire « conventionnel » (RT) pour le neuf

3.4.1 - Scénarios d'occupation dans les calculs RT

Rappel de la définition d'un « local servant à réunir de façon intermittente des personnes », au sens de la RT. :

«Un local est défini comme servant à réunir de façon intermittente des personnes si les modalités d'utilisation du local sont aléatoires en termes d'occupation ou de non-occupation et en termes de nombre d'occupants. Les salles de réunion des bâtiments de bureaux, les salles de réunion publiques sont considérées comme appartenant à cette catégorie. Les salles de spectacle, les bureaux paysagers, les salles de restaurant ne sont pas considérées comme y appartenant.»

Coefficient « Crdbnr » de référence pour les locaux servant à réunir de façon intermittente des personnes :

Crdbnr = 0,5

(Coefficient de réduction de débit pour les bâtiments non résidentiels)

Scénarios d'occupation (et niveaux de température) conventionnels :

- Pour l'hôtellerie et les établissements d'hébergement :
 - Horaires d'occupation : LONGS
 - 16 h/jour du lundi au vendredi : 0h->10h et 18h->24h
 - 24 h/jour le samedi et le dimanche
 - Niveau de température : MOYEN
 - 19 °C en occupation
 - 16 °C, réduit < 48 h
 - 7 °C, réduit > 48 h
- Pour la grande majorité des bâtiments tertiaires :
 - Horaires d'occupation : MOYENS
 - 10 h/jour, du lundi au vendredi : 8 h -> 18 h
 - Niveau de température : MOYEN
 - 19 °C en occupation
 - 16 °C, réduit < 48 h
 - 7 °C, réduit > 48 h

3.4.2 - Prise en compte de la modulation de débit sur les systèmes dits de « ventilation hygiénique »

Les débits de ventilations sont plus ou moins réduits suivant le type de système de modulation choisi. Les puissances des ventilateurs sont réduites dans les mêmes proportions. Le coefficient réducteur est Crdbnr.

-> Valeurs par défaut :

- détection d'utilisation : Crdbnr = 0,9
- comptage d'occupants ou sonde de CO₂ : Crdbnr = 0,8

-> Des valeurs différentes de Crdbnr peuvent être issues de procédures d'Avis Techniques (cf. Chapitre 2.4) ; elles sont (nettement) plus favorables que les valeurs par défaut car ces systèmes ont justifié de leur fonctionnement lors de l'instruction.

NB : Les éditeurs de logiciels de calculs réglementaires ont normalement pris en compte les ATEC des systèmes de modulation de débit, et proposent les tableaux de valeurs des coefficients Crdbnr correspondants, pour aider les bureaux d'études à renseigner le paramètre Crdbnr en fonction du système prévu.

3.4.3 - Prise en compte de la modulation de débit sur les systèmes « tout air »

On distingue les systèmes à débit d'air constant et les systèmes à débit d'air variable.

On utilise deux valeurs nominales pour la puissance des ventilateurs, Pvent :

- en occupation : Pvent_occ
- en inoccupation : Pvent_inocc

On applique la même règle au soufflage et à la reprise.

Pour les systèmes à débit d'air variable :

- Pvent_moy : déterminée pour le débit hygiénique + 10 %, en prenant en compte si nécessaire le taux de recyclage ;
- En occupation : Pvent_moy_occ = Pvent_occ x Cvent_DAV ;
- En inoccupation : Pvent_moy_inocc = Pvent_inocc x Cvent_DAV.

Cvent_DAV dépend du débit minimal possible véhiculé et du type de variation de vitesse, il est donné dans le tableau ci-dessous.

On distingue trois classes de débit minimal :

- débit minimal possible inférieur à 40 % du débit nominal ;
- débit minimal possible entre 40 % et 70 % du débit nominal ;
- débit minimal possible entre 70 % et 100 % du débit nominal.

C _{vent_DAV}	Débit minimal possible/Débit nominal		
	<40%	de 40% à 70%	>70%
Type de variation de vitesse			
Variation électronique de vitesse	0,6	0,8	1
Hélicoïde à pales variables			
Inclineur et moteur à 2 vitesse	0,7	1	1
Registre avec ventilateur à action	0,8	1	1
autres	1	1	1

Note : le coefficient C_{vent_DAV} représente le gain moyen sur la consommation électrique du ventilateur selon la gamme retenue de variation de débit (cf. courbe § 3.3.2)

3.4.4 - Exemple de calcul RT

L'exemple ci-dessous montre l'impact de la modulation de débit sur une salle de réunion d'un bâtiment de bureaux, équipée d'un système de ventilation hygiénique double flux.

La configuration de base est la suivante :

- Dimensions : 10 m x 10 m x 3 m (HSP) ;
- Prévue pour accueillir au maximum 40 personnes ;
- $U_{bât} = 0,327 \text{ W/m}^2.K$; $U_{bâtref} = 0,385 \text{ W/m}^2.K$;
- Système de ventilation :
 - Double flux hygiénique avec récupération (échangeur statique d'efficacité 60 %) ;
 - Débit nominal en occupation : 720 m³/h (soufflage = extraction) ;
 - Débit nominal en inoccupation : 0 m³/h (soufflage = extraction) ;
 - Puissance nominale des ventilateurs : 300 W (total) ;
- Système de chauffage/refroidissement :
 - Climatisation réversible type multisplit ;
 - $P_{ch} = P_{fr} = 10 \text{ kW}$;
 - $COP = 3,5$; $EER = 3,8$;
- Eclairage : 12 W/m² ; interrupteur + détection de présence ;
- Météo : zone H1c – Station de Lyon-Bron.

Les différents cas ci-dessous de modulation de débit sont testés :

- Cas n°1 : Aucune modulation ($Cr_{dbnr} = 1$) ;
- Cas n°2 : Modulation par détection de présence ($Cr_{dbnr} = 0,9$) ;
- Cas n°3 : Modulation par détection de CO₂ ($Cr_{dbnr} = 0,8$) forfaitaire ;
- Cas n°4 : Modulation par système sous Avis Technique, avec sonde CO₂ et action sur le module d'air ($Cr_{dbnr} = 0,29$).

Les puissances de ventilateurs sont calculées en appliquant les coefficients Crdbnr ci-dessus au débit nominal et en déterminant ensuite la puissance des ventilateurs.

Le tableau ci-dessous récapitule les principaux résultats des calculs RT obtenus avec un logiciel certifié.

Les consommations conventionnelles indiquées dans le tableau sont exprimées en : kWh d'énergie primaire (EP)/m²/an.

On a indiqué, en % :

- les gains par rapport à la référence ;
- mais surtout les gains des Cas n°2, 3 et 4 par rapport au Cas n°1 (sans modulation).

	Cep	Cch	Cfr	Aux.	Vent.
Référence	196,2	50,0	24,8	5,9	60,1
Cas n°1	133,2	39,2	12,3	4,4	20,2
Gain/réf.	32,1%	21,6%	50,4%	25,4%	66,4%
Cas n°2	129,9	38,0	12,6	4,5	18,2
Gain/réf.	33,8%	24,0%	49,2%	23,7%	69,7%
Gain/Cas n°1	2,5%	3,1%	-2,4%	-2,3%	9,9%
Cas n°3	127,0	36,5	13,1	4,6	16,2
Gain/réf.	35,3%	27,0%	47,2%	22,0%	73,0%
Gain/Cas n°1	4,7%	6,9%	-6,5%	-4,5%	19,8%
Cas n°4	110,8	29,0	15,0	4,4	5,9
Gain/réf.	43,5%	42,0%	39,5%	25,4%	90,2%
Gain/Cas n°1	16,8%	26,0%	-22,0%	0,0%	70,8%

Ainsi, il ressort principalement de cet exemple :

- la modulation la plus performante permet de gagner environ :
 - 17 % sur le Cep ;
 - 26 % sur les consommations de chauffage ;
 - 71 % sur les consommations des ventilateurs ;

- mais elle peut faire perdre 22 % sur les consommations de climatisation (cf. § 3.2) dans le bâtiment climatisé sans free-cooling..

3.5 - Gains énergétiques obtenus sur site : comment les quantifier ?

L'évaluation des gains énergétiques obtenus sur les installations de modulation de débit nécessite d'une part de mesurer des consommations (consommations thermiques et consommations électriques) et d'autre part de comparer à des situations « sans modulation ».

3.5.1 - Mesure des consommations d'énergies

C'est un problème fondamental pour un prescripteur de ventilation choisissant une technologie de ventilation modulée, particulièrement s'il opère sur le long terme avec une obligation de résultat.

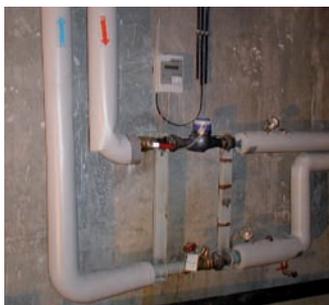
Si la part de la consommation d'énergie du local desservi par le système est marginale par rapport à la consommation totale du bâtiment, l'effet de réduction de consommation est complètement noyé. C'est souvent le cas.

Dans ce cas, il faut individualiser le comptage d'énergie au niveau du local.

Pour le comptage électrique, il est possible de mesurer la consommation des ventilateurs avant et après modulations de débit avec une pince ampérométrique.

Si la modulation des ventilateurs est faite par variation de fréquence, la mesure est impossible. Il faut un compteur électrique de puissance utile.

Pour la consommation de chaleur ou de froid, il faut installer des compteurs d'énergie sur les échangeurs alimentant le local. L'instrumentation de comptage devient alors plus onéreuse que l'équipement.



Compteur de chaleur installé sur une boucle d'eau chaude alimentant une CTA de 10 000 m³/h, destiné à prouver les économies d'énergie générées par la ventilation modulée. Dans ce cas, cet équipement se justifie « à titre probatoire », pour un projet de travaux sur le reste du bâtiment.

3.5.2 - Evaluation des gains

Il faut comparer les consommations réellement obtenues dans la configuration « avec modulation » aux consommations qui auraient été obtenues dans la configuration « sans modulation » :

- dans l'existant, si l'on dispose d'une situation antérieure où la modulation de débits n'était pas en place, on peut essayer de comparer avec la nouvelle situation (avec les difficultés que cela comporte en terme de conditions de fonctionnement : climat, occupation, zonage, consignes, etc.) ;
- dans l'existant ou dans le neuf, si l'on dispose d'une autre installation dans une autre partie similaire de bâtiment par exemple, on peut essayer de comparer les deux configurations, fonctionnant en parallèle ;
- dans l'existant ou dans le neuf, si l'on ne dispose pas d'installation « non modulée » fonctionnant en parallèle, il faut alors effectuer une simulation de ce que seraient les consommations si l'on n'avait pas mis en place la modulation de débit...

3.6 - Exemples de gains obtenus sur le terrain

Le tableau ci-dessous récapitule les gains obtenus dans différentes études de terrain et les compare lorsque c'est possible aux résultats mesurés avant et après équipement (exercice toujours difficile).

Site	Taux d'occupation / heures de fonctionnement	Equipement	Gains théoriques Chauffage	Gains expérimentaux Chauffage	Gains théoriques électrique	Gains expérimentaux électrique (consommation ventilateur)
Nombreux grands espaces multizones desservis par une CTA (amphithéâtres, auditorium etc....)	Entre 5 et 70 %	CTA équipées de modules non packagés avec régulation sur GTC.	Entre 20 et 40 %	Entre 20 et 60 %	40%	Entre 20 et 60%.
Grand site tertiaire (> 5000 m ²) multizone	Entre 40 et 60%	CTA équipées de variateurs avec régulation GTC.	10%	15%	17 % (sur le bâtiment)	15%
Site tertiaire de 1000 m ² multizone	Entre 40 et 60 %	Solution packagée registres asservis au CO2 + régulation de variateurs en DP.	30%	23%	40%	30 % (sur les ventilateurs uniquement).
Site tertiaire, bureaux de 1000 m ² .	60 %	Solution packagée registres asservis au CO2	30%	25%	Néant.	Néant.
Ecole	60%	proportionnel (agitation)		84%		-
Centre de rééducation (salle de gym)	50%	proportionnel (CO2)				45%
Centre de rééducation (salle de consultation)	100%	présence		51%		
Bibliothèque universitaire	80%	proportionnel (CO2)		77%		65%
Comité d'école	5%	présence		87%		23%
Tribunal de grande instance de Créteil	30%	proportionnel (CO2)		63%		-
Bâtiment de bureaux	15%	présence		85%		-
	4%	proportionnel (CO2)		76%		-
Amphithéâtre Université	65%	proportionnel (CO2)		Non connu (mais 35% en global sur le chauffage)		60%
Ecoles en Norvège	73%	proportionnel (CO2)		36%		-
		Comptage (capteur infrarouge)		51%		-

Note : les résultats montrent une bonne concordance entre ce qui est prévu par l'étude et ce qui est mesuré avant et après équipement. Cependant, les consommations énergétiques sont très variables d'un site à l'autre et l'étude ne différencie pas forcément ces consommations. La consommation de chauffage peut ainsi varier de 10 à 150 kWh/m² dans le tertiaire (selon l'enveloppe, les apports internes, l'utilisation, l'exploitation etc...). Si l'étude peut prévoir un abattement relatif avec une bonne précision, elle peut malheureusement faire de très grandes erreurs sur l'estimation du chauffage de l'air, en situation de référence.

Les taux d'occupation (souvent mesurés avec précision) sont aussi très variables d'un site à l'autre et doivent être estimés sans trop d'erreur pour une étude significative.

Rentabilité de la modulation de débit

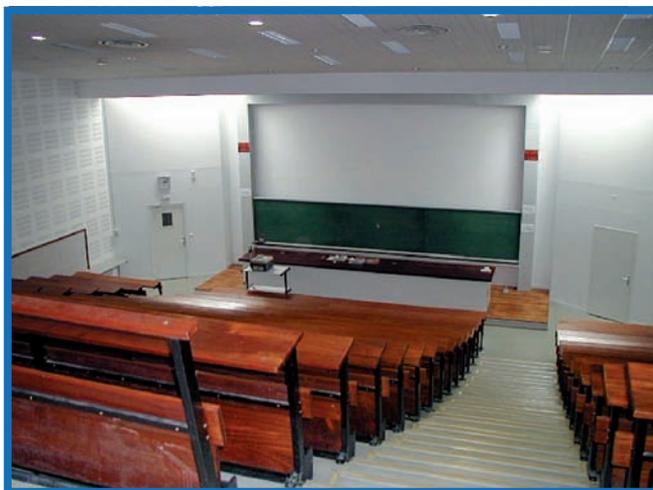
Dans la réalité, il est souvent très difficile de démontrer l'apport d'une ventilation modulée dans le bilan d'un bâtiment, sauf si celui-ci est ventilé à plus de 50 % par de la ventilation modulée.

La rentabilité de la modulation de débit est examinée au Chapitre 4, sur la base des retours technico-économiques.

4 - Exemples de sites

4.1 - Exemple de l'équipement en rénovation d'un amphithéâtre universitaire

- Amphithéâtre universitaire de 300 places ventilé en double flux par une CTA de 9 000 m³/h (8 Volume /heure).
- Chauffage tout air, sans climatisation.
 - Local monozone, étanche, aveugle, température de non chauffage de 16 °C.
- Nature de la rénovation : modulation du débit de soufflage et extraction par variateurs sur moteurs de ventilateurs et modulation du mélange air neuf/air recyclé sur les volets de la CTA. Capteur de CO₂ en gaine de reprise. Refonte de l'automatisme de conduite de la CTA.
- Un amphithéâtre jumeau, desservi par une CTA similaire en débit constant a été gardé en l'état.



4.1.1 - Coût matériel

Rappel : il s'agissait d'un équipement en rénovation sur du matériel en exploitation.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Capteur de CO2	280
Variateurs électroniques de puissance	1 400
Supplément automatisme	200
Total matériel	1 880

4.1.2 - Coûts travaux

Les coûts sont révisés suivant les prix de 2008 et l'expérience de nombreuses installations similaires.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Etude, programmation de la régulation	2 000
Câblage, connexion dans armoire électrique existante	1 200
Intervention sur le réseau aéraulique	0
Travaux de plomberie, maçonnerie, menuiserie	0
Total travaux de rénovation	3 200

4.1.3 - Coût de la Maintenance

Mesurée sur 5 années d'exploitation continues.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Un variateur électronique de vitesse encrassé, avec dépose, pose	450
Vieillessement accéléré sur le moteur de registres plus sollicité	150
Étalonnage du capteur (aucune dérive constatée sur 5 ans)	0
Intervention sur le réseau aéraulique : la modulation de vitesse amoindrit les sautes de pression et économise sensiblement la tenue du réseau.	-400
Remplacement des filtres (moins d'encrassement des filtres attribués à des débits plus faibles).	-300
Maintenance des groupes ventilateurs (moins d'usure sur les courroies, bobines).	-200
Total	- 300

4.1.4 - Maintenance

Maintenance effectuée par le personnel exploitant le bâtiment (filtres, courroies, moteurs, contrôle de la régulation etc..). Pas de gamme de maintenance spécifique imposée par la ventilation régulée. Seuls contrôles supplémentaires : fonctionnement des variateurs et vérification annuelle du signal du capteur salle vide.

4.1.5 - Fonctionnement 7 ans après

Fonctionnement strictement conforme au cahier des charges. Les sorties de la régulation sont enregistrées. Pas de dérive visible du capteur de CO₂, sans aucune correction de signal. Pas de dérive des variateurs de fréquence. On retiendra cependant les dépannages mentionnés au paragraphe précédent.

La CTA équipée de ventilation modulée, ainsi que le réseau aéraulique en amont sont manifestement mieux préservés que l'équipement voisin qui est strictement jumeau mais non modulé (défoncements de la gaine de soufflage et portes filtres désaxés). Cette légère dégradation est attribuée aux nombreux arrêts et démarrages par à coups, évités sur la CTA fonctionnant en modulation.

4.1.6 - Gain d'énergie calculé

Nous avons de nombreuses données mesurées pour le calcul d'énergie économisée.

La ventilation est assurée 2 626 heures dans l'année.

La température de non chauffage de l'amphithéâtre est de 16 °C, au lieu de 18°C ; on prendra donc une température de base pour le calcul des degrés jours diminué de 2 °C par rapport à la température de consigne (21°C).

L'équation fondamentale d'économie d'énergie est $DRA = 0.34 \cdot Q_v \cdot \Delta T$.
 Rapporté sur une année l'équation devient $DRA = 0.34 \cdot \text{degrés jours retenus} \cdot Q_v \cdot (24 \cdot \text{nombre d'heures de ventilation} / 8760) / \text{Rendement}$

Les prix du kWh gaz et électriques sont les prix moyens sur du petit tertiaire, à savoir 0.043 et 0.059 Euros par kWh. On applique un rendement moyen de chauffage de 65 % sur le chauffage par CTA.

Calcul :

Chauffage

Nombre d'heures de fonctionnement annuel	2628
Débit horaire en m ³ /h	9000
Degrés jours Saint Etienne (base 18°C)	2794
Degrés jours Saint Etienne corrigé à 19°C, sur 220 jours de chauffe	3014
Energie initiale de chauffage en kWh	102161
Abattement mesuré sur le débit d'air : en %. En fait, c'est la différence entre le débit d'air modulé et le débit d'air forfaire qui était fixé à 25%.	7
Economie de chauffage en kWh	7151
Prix du kWh de chauffage par plancher chauffant	0,043
Economie annuelle de chauffage en Euros	307,50

Electricité

Puissance électrique de ventilation	4060,00
Energie électrique initiale annuelle en kWh	10669,68
Abattement mesuré en %	60,00
Economie électrique annuelle en kWh	6401,81
Prix du kWh électrique moyen annuel	0,06
Economie annuelle en Euros	377,71

GAIN ANNUEL TOTAL (euros) **685,21**

Le gain de chauffage est ainsi calculé à 7 761 kWh par an.

Le temps de retour sur Investissement est donc de 7 ans ;

Le calcul officiel RT 2005 aurait retenu un nombre de degrés jours sur une base 21 et un débit nominal de 9 000 m³/h, avec un coefficient d'abattement de 0.2 (crdnb de 0.8). Un coefficient de 0.5 aurait été appliqué.

Formule : $DRA = 0.34 \cdot \text{degrés jours retenus} \cdot Qv \cdot 24 \cdot (\text{nombre de ventilation} / 8760) / \text{rendement}$

$DRA = 0.34 \cdot 0.2 \cdot 3\,454 \cdot 9000 \cdot 24 \cdot (2628/8760) / 0.65$
11 707 kWh annuels.

L'économie calculée est majorée par le non prise en compte des conditions d'exploitations préexistantes, très économes en débit d'air (non contrôlé en QAI).

4.1.7 - Gain d'énergie mesuré

Mesurée après 5 ans d'exploitation continue. Comptage de chaleur délivrée sur la batterie et d'électricité consommée par la «CTA 2» comparée aux consommations de la CTA voisine (CTA 1), strictement identique, desservant un amphithéâtre jumeau à occupation comparable mais à débit fixe.

Consommation électrique :

CTA 1 : 45 222 kWh elec

CTA 2 : 18 271 kWh elec

Consommation d'eau chaude :

CTA 1 : 123.2 MWh

CTA 2 : 80.6 MWh.

Soit une économie de 8 520 kWh par hiver.

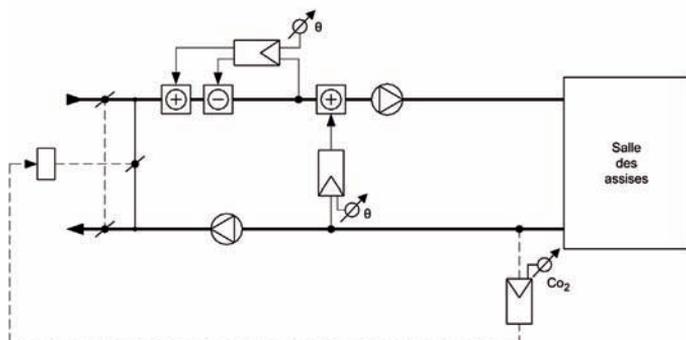
On remarque un bon recouvrement entre le calcul énergétique et la mesure (décalage de 17%).

Pour l'électricité, l'économie annuelle est de 5390 kWh quand le calcul en prédit 6400 kWh. Le calcul électrique est toujours optimiste car il ne prévoit pas les surrégimes imposés par le free-cooling et les purges de pollution.

4.2 - Equipement en rénovation sur tribunal de grande instance de Créteil.

- Salle d'audience de tribunal, grand volume, aveugle, isolée (1 800 m³).

- CTA ancienne (30 ans), débit d'air total fixe, double flux, chauffage-rafraîchissement, régulation de la proportion d'air neuf en fonction de la température extérieure. Débit minimal d'air neuf : 30 %.
- Nature de la rénovation : après une réparation apportée au servomoteur commandant la proportion de mélange d'air, apport d'une régulation de ces volets en fonction de la concentration de CO_2 mesurée sur gaine de reprise d'air. Pas de régulation du débit d'air total car interférence sur la régulation de la température.



air·h

4.2.1 - Coût matériel

Rappel : il s'agissait d'un équipement en rénovation sur du matériel en exploitation.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Capteur de CO ₂ Vaisala – montage mural	377
Automate de régulation Honeywell + sonde CO ₂ montage gaine	903
Réparation de la commande registres d'air (changement des deux servomoteurs intégrés dans maintenance traditionnelle) – servomoteur Honeywell	450
Total matériel	1 730

4.2.2 - Coût travaux

Les coûts sont révisés suivant les prix de 2008 et l'expérience de nombreuses installations similaires.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Etude, programmation de la régulation	615
Câblage, connexion dans armoire électrique existante	70
Intervention sur le réseau aéraulique	0
Travaux de plomberie, maçonnerie, menuiserie	0
Total travaux de rénovation	135

Travaux réalisé principalement en interne : coût actuel technicien :
615 € HT

Longueur câble : capteur-régulateur-armoire électrique : une dizaine
de mètres.

4.2.3 - Maintenance

Pas d'information à ce jour. A la demande du tribunal, l'installation
avait été remise à son état initial : présence d'une horloge, absence
de régulation du débit

d'air neuf en fonction du CO₂. L'exploitant jugeait que la régulation du débit d'air selon l'assistance était incompatible avec la régulation de la température. C'est une entrave classique au déploiement des solutions de ventilation modulée en chauffage tout air, sur de grands volumes.

4.2.4 - Gain d'énergie mesuré

Les gains thermiques ont été déterminés à partir des deux semaines de mesures sur site (semaine « été » et semaine « hiver »).

Période de mesure « hiver » :

Energie liée au renouvellement d'air sans modulation des débits :
266 kWh

Energie liée au renouvellement d'air avec modulation des débits :
99 kWh

Période de mesure « été » :

Energie liée au renouvellement d'air sans modulation des débits :
375 kWh

Energie liée au renouvellement d'air avec modulation des débits :
131 kWh

Energie calculée selon les débits d'air.

4.3 - Salle de restaurant scolaire

Matériel sur équipement neuf : système à capteur de CO₂ VariV d'Atlantic

- Salle à manger scolaire de 150 m³, pour 50 enfants.
Ventilation 12 heures par jour. Site en construction.
- Chauffage par radiateurs.
- Double flux tout air neuf de 1 100 m³/h. Asservissement de variateurs de tension des deux ventilateurs à la concentration de CO₂. Filtres, batterie d'eau chaude.
- Installation des caissons dans les combles. Réseau aéraulique en sous plafond.

4.3.1 - Coût matériel

Rappel : équipement neuf que l'on veut comparer à un équipement neuf sans modulation de la ventilation.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Système Vari-V (sonde CO2 + variateurs de tension)	1478 €
Caisson double flux sans modulation du débit avec batterie eau chaude	1706 €
Total matériel surcoût de modulation	1 478 €

4.3.2 - Coût travaux

Les coûts sont révisés suivant les prix de 2008.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Etude, programmation de la régulation	100
Câblage, connexion capteur – caissons- variateurs	210
Total travaux spécifiques à la Ventilation Modulée	

4.3.3 - Maintenance

Aucune maintenance n'est effectuée sur ce système. Pas de délégation de maintenance. Le personnel technique du centre n'a pas d'information sur le produit, ses performances ni la maintenance. L'absence de maintenance pour le renouvellement du filtre posera à terme des problèmes de fonctionnement. Bon état apparent du système dans les combles.



4.3.4 - Fonctionnement 5 ans après

Le système fonctionnait à débit minimum au début de notre visite. En soufflant sur le capteur, après une période de temporisation, le système s'est mis à 100 % du régime. Intégrité complète du fonctionnement 5 ans après la mise en service.

Selon le personnel rencontré, pas de problème identifié si ce n'est le manque de synchronisme entre horloge chauffage et horloge ventilation : si la ventilation est demandée alors que le chauffage n'est pas enclenché, impression de froid ressentie par le personnel (un des problèmes de la ventilation en absence de préchauffage ou de récupérateur).

Enfin, notons que les entrées d'air prévues pour une ventilation en simple flux ont été conservées sur les huisseries, ce qui augmente la perméabilité de la salle et contribue aux fortes déperditions.

4.3.5 - Gain d'énergie mesuré

Nous avons de nombreuses données fiables pour le calcul d'énergie économisée.

La ventilation est assurée 11 heures par jours, 77 heures par semaine et 35 semaines dans l'année : 2 464 heures dans l'année.

Au vues du diagnostic, on peut faire l'hypothèse d'une salle où les déperditions compensent les apports internes : on se base donc sur un besoin en degrés jours de base 20 (à Macon)

L'équation fondamentale d'économie d'énergie est $DRA = 0.34 \cdot Q_v \cdot T$.

air · h

Rapporté sur une année l'équation devient $DRA = 0.34 \cdot \text{degrés jours retenus} \cdot Q_v \cdot 24 \cdot (\text{nombre de ventilation} / 8\,760) / \text{rendement}$.
On applique un rendement moyen de chauffage de 75 % sur le chauffage radiateurs

Les prix du kWh gaz et électriques sont les prix moyens sur du petit tertiaire, à savoir 0.043 et 0.059 Euros par kWh.

Calcul :

Chauffage	
Nombre d'heures de fonctionnement annuel	2464
Débit horaire en m3/h	1100
Degrés jours Macon (base 18°C)	2717
Degrés jours Ambérieu corrigé à 20°C, sur 220 jours de chauffe	3157
Energie initiale de chauffage en kWh	10628
Abattement mesuré sur le débit d'air : en %	77
Economie de chauffage en kWh	8183
Prix du kWh de chauffage par chaudière gaz sur radiateurs	0,057
Economie annuelle de chauffage en Euros	469,17

Electricité	
Puissance électrique de ventilation	600,00
Energie électrique initiale annuelle en kWh	1478,40
Abattement mesuré en %	65,00
Economie électrique annuelle en kWh	960,96
Prix du kWh électrique moyen annuel	0,06
Economie annuelle en Euros	56,70

GAIN ANNUEL TOTAL (euros)	525,87
------------------------------------	---------------

Le temps de retour sur Investissement est donc entre 4 et 5 ans.

Le calcul officiel RT impose un abattement de 0.2 (1-crdbnr) au lieu de 0.7. On prend les mêmes degrés jours. Puis, on divise cette DRA par deux pour tenir compte des apports internes. Nous ne le retiendrons pas ici.

L'économie d'énergie attendue est de 1 062 kWh. La différence s'explique par le crdbnr très pessimiste par rapport aux performances réalisées. Le coefficient de 0.5 ne se justifie pas dans cette salle où les déperditions compensent largement les apports internes.

4.4 - Centre de kinésithérapie, salle de gymnastique

- Salle de gymnastique de 360 m³, pour 20 personnes.
- Chauffage et rafraîchissement par planchers irrigué par chaudière gaz.
- Double flux tout air neuf de 465 m³/h. Asservissement de variateurs de tension des deux ventilateurs à la concentration de CO₂. Filtre, batterie d'eau chaude.
- Réseau aéraulique en sous plafond.

4.4.1 - Coût matériel

Rappel : équipement neuf que l'on veut comparer à un équipement neuf double flux sans modulation de la ventilation.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Variateurs de tension pour moteur Crit Air de 110 W de 460 m ³ /h : Comatec T8021035	300 €
Capteur de CO2 QPA 63 de Siemens	875 €
Total matériel	1 175 €

4.4.2 - Coût travaux

Les coûts sont révisés suivant les prix de 2008.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Etude, programmation de la régulation	125 €
Pose de 20 mètres de câble électrique en combles	110 €
Raccords électriques	105 €
Total travaux attribués à la ventilation modulée	340 €

4.4.3 - Maintenance

Aucune maintenance n'est effectuée sur ce système. Pas de délégation de maintenance. Le personnel technique du centre n'a pas d'information sur le produit, ses performances ni la maintenance. L'absence de gamme de maintenance pour le renouvellement du filtre posera à terme des problèmes de fonctionnement.

4.4.4 - Fonctionnement 5 ans après

Pas de problème visible de fonctionnement. Ventilation assurée en double flux. Lors de notre visite, la ventilation à pleine puissance était demandée par une assistance pleine.

Abords de la grille d'extraction légèrement encrassée (qui prouve un fonctionnement continu).

Ce type d'encrassement par fibres textiles est classique dans ce type de salle.

Satisfaction du personnel du centre, pas de plainte.



Photographie des gaines et du caisson de ventilation de la salle de gymnastique.

4.4.5 - Gain d'énergie mesuré

Nous avons de nombreuses données fiables pour le calcul d'énergie économisée.

La ventilation est assurée 24h sur 24, toute l'année.

Les enregistrements ont montré une différence moyenne de 1 degré entre températures d'extraction et de soufflage, durant la saison de chauffe. La température de consigne étant de 20°C, le solde apports internes - déperditions étant de 1 °C, la base des degrés jours devant entrer dans de calcul des déperditions d'air est une base 19°C.

Le nombre de degrés jours retenus est celui d'Ambérieu en base 18.

La conversion en degrés jours base 19 se fait sur 220 jours de chauffage.

L'équation fondamentale d'économie d'énergie est $DRA = 0.34 \cdot Q_v \cdot \Delta T$. Rapporté sur une année l'équation devient $DRA = 0.34 \cdot \text{degrés jours retenus} \cdot Q_v \cdot 24 / \text{rendement}$

Les prix du kWh gaz et électriques sont les prix moyens sur du petit tertiaire, à savoir 0.043 et 0.059 Euros par kWh. On applique un rendement moyen de chauffage de 65 % sur le plancher chauffant.

Calcul :

Chauffage

Nombre d'heures de fonctionnement annuel	8760
Débit horaire en m3/h	440
Degrés jours Ambérieu (base 18°C)	2782
Degrés jours Ambérieu corrigé à 19°C, sur 220 jours de chauffe	3002
Energie initiale de chauffage en kWh	16582
Abattement mesuré sur le débit d'air : en %	51
Economie de chauffage en kWh	8457
Prix du kWh de chauffage par plancher chauffant	0,043
Economie annuelle de chauffage en Euros	363,65

Electricité

Puissance électrique de ventilation	220,00
Energie électrique initiale annuelle en kWh	1927,20
Abattement mesuré en %	45,00
Economie électrique annuelle en kWh	867,24
Prix du kWh électrique moyen annuel	0,06
Economie annuelle en Euros	51,17

GAIN ANNUEL TOTAL (euros)

414,81

Le temps de retour sur Investissement est donc inférieur à 4 ans.

Le calcul officiel aurait pris une base de degrés jours à 20 degrés (3 222), un abattement de 0.2 et un coefficient de réduction de 0.5.

L'économie de chauffage calculée serait de 4 535 kWh.

On note encore le décalage dans les résultats.

4.5 - Centre de kinésithérapie, salle santé

Matériel sur équipement neuf : Anjos, système détection de présence ALIZE VISION

- Zone santé composée de 7 salles de soins (volume entre 25 et 50 m³).
- Chauffage et rafraîchissement par planchers irrigué par chaudière gaz.
- En zone santé : une salle équipée de ventilation à détection de présence ALIZE VISION, bouche d'extraction à bi-débits, comparée à 1 salle à entrée et sortie autoréglables. Diffusion de 7.5-50 m³/h.
- Réseau aéraulique en sous plafond.



Remplacement de pile sur une bouche de diffusion

4.5.1 - Coût matériel

Rappel : équipement neuf que l'on veut comparer à un équipement neuf simple flux en extraction par bouche autoréglable, sans modulation de la ventilation.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Bouche d'extraction ALIZE VISION tertiaire de 50 m ³ /h à la place d'une bouche autoréglable de 45m ³ /h.	40 €
Entrée d'air autoréglable AERA de 30 m ³ /h	10 €
Total matériel	50

4.5.2 - Coût travaux

Pas de surcoût estimé pour la pose de la bouche.

4.5.3 - Maintenance

Aucune maintenance apportée au système. Le personnel technique du Centre ignore le fonctionnement du système. Pas de délégation de maintenance.

4.5.4 - Fonctionnement 5 ans après

Comme on pouvait le redouter, les 3 piles LR03 de 1.5 V sont hors services et la bouche ne fonctionne plus (blocage en position mini). Il n'y a pas de moyen simple de contrôler le fonctionnement de la bouche.

Pour ce type d'application, une alimentation sur pile nous semble rédhibitoire. Il faut absolument une alimentation sur secteur.

Coût estimé du raccord : 70 €.

4.5.5 - Gain d'énergie mesuré

Calcul exactement comparable à celui du 4.5.

Nous ne pouvons déterminer la température de non chauffage et nous appliquons donc la règle d'abattement de 50 % applicable aux calculs de certificats d'Economies d'Energies. Nous prenons des degrés jours sur une base 20°C.

Chauffage

Nombre d'heures de fonctionnement annuel	8760
Débit horaire en m3/h	45
Degrés jours Ambérieu (base 18°C)	2782
Degrés jours Ambérieu corrigé à 20°C, sur 220 jours de chauffe	3222
Energie initiale de chauffage en kWh	910
Abattement mesuré sur le débit d'air : en %	51
Economie de chauffage en kWh	464
Prix du kWh de chauffage par plancher chauffant	0,043
Economie annuelle de chauffage en Euros	19,96

L'économie électrique n'est pas calculée. Elle se situe au maximum à 10% de celle calculée dans l'exemple précédent.

Le gain économique se situe entre 20 et 25 euros par an.

Equipement amorti en deux ans.

4.6 - Exemple de l'équipement en rénovation d'une salle de travail bibliothèque

Maître d'œuvre : ELYO Cylergie

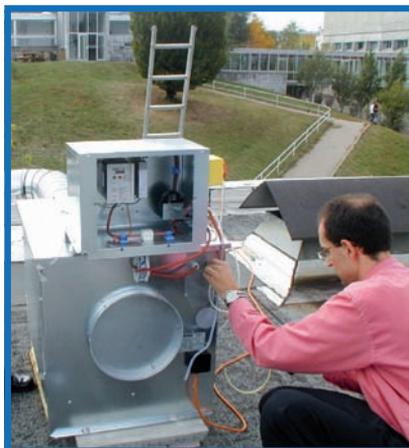
Matériel : Aldes Agito

- Salle de bibliothèque universitaire de 86 m³ pour 25 personnes.
- VMC extractive partagée avec d'autres salles et sanitaires. La salle étudiée correspond à 450 m³/h sur un total réseau de 675 m³/h.
- Installation de 2 modules MDA en sous plafond, avec détection de mouvement Agito par 4 capteurs intégrés. Installation d'un ventilateur d'extraction VEC 240 H avec capteurs de pression.
- Caisson d'extraction en toiture, réseau en gaine technique et sous plafond.
- Ces équipements ont nécessité le remplacement des entrées d'air et des gaines du réseau d'extraction.

Photographie de la salle de la bibliothèque. On distingue le capteur d'agitation et les bouches d'entrée d'air.



Réglage du caisson d'extraction, en terrasse.



4.6.1 - Coût matériel

Rappel : équipement en rénovation d'un système VMC extractive sous dimensionnée. On ne prend pas en compte les frais de mise à niveau de ce système.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
2 bouches d'extraction MDA	680 €
2 bouches d'extraction autoréglables	70 €
Caisson d'extraction avec moteur microwatt et régulation de la dépression	1050 €
Total matériel	1660

4.6.2 - Coût travaux

Les coûts sont révisés suivant les prix de 2008 et l'expérience de nombreuses installations similaires.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Remplacement des bouches d'extraction	180 €
Découpe des gaines en sous plafond	100 €
Câblage électrique des MDA	120 €
Installation du caisson d'extraction	260 €
Total travaux attribués à la ventilation modulée	660 €

4.6.3 - Maintenance

Aucune maintenance prédictive pour ce système. Un seul problème rencontré sur le caisson (sonde de pression remplacée).

Certains usagers ont tendance à se plaindre des variations de bruit d'aspiration, dans la salle voisine. Ceci peut être une des conséquences d'une régulation chrono-proportionnelle, quand le système de ventilation dessert peu de salles avec notamment une particularité sur ce chantier de rénovation, une grande salle modulée et deux petites salles non modulées.

4.6.4 - Gain d'énergie mesuré

Uniquement sur période d'étude (1 semaine). Pas de retour sur 4 ans.

Economies électriques

Consommations et économies	Quantité	Unité
Energie consommée pendant la période sans Ventilation Modulée	31,7	kWh
Energie consommée pendant la période avec Ventilation Modulée	24,3	kWh
Economie d'énergie électrique	7,4	kWh
Gain	23%	

Economies thermiques

Consommations et économies	Quantité	Unité
Energie liée au renouvellement d'air sans Ventilation Modulée ($Q_v = 370 \text{ m}^3/\text{h}$)	52,2	kWh
Energie liée au renouvellement d'air consommée pendant la période avec Ventilation Modulée	6,8	kWh
Economie d'énergie thermique	45,4	kWh
Gain	87%	

Le système se montre très efficace en gestion du chauffage.

4.7 - Equipement en neuf sur salle de classe

Matériel : Aldes Agito

- Salle de classe de 25 élèves et 167 m^3 .
- Ventilation double flux avec échangeur statique. Chauffage à eau chaude avec chaudière au gaz.

- Equipement de deux MDA maîtres et 2 MDA esclaves, avec 4 capteurs d'agitation. Débit de soufflage de 450 m³/h.
- Composant MDA inséré dans gaine aéraulique de sous plafond.

4.7.1 - Coût matériel

Rappel : équipement neuf que l'on veut comparer à un équipement neuf sans modulation de la ventilation.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
4 bouches d'extraction MDA	690 €
4 capteurs optiques.	150 €
Total matériel	840 €

4.7.2 - Coût travaux

Les coûts sont révisés suivant les prix de 2008 et l'expérience de nombreuses installations similaires.

	Prix brut, hors marge d'installateurs en Euros HT.
Connexion électrique des MDA.	60 €
Connexion des MDA entre eux et connexion MDA- capteurs.	80 €
Installation des 4 capteurs.	40 €
Total travaux attribués à la ventilation modulée	180 €

4.7.3 - Maintenance

Aucune maintenance particulière apportée à ce système. Le personnel technique n'a pas connaissance de la spécificité de cette salle de classe. La maintenance sur l'installation globale de la ventilation porte essentiellement sur le remplacement des filtres.

4.7.4 - Gain d'énergie mesuré

La période d'étude a porté sur une année scolaire entière. La ventilation est assurée 11 heures par jour, 55 heures par semaine et 245 jours par an.

L'équation fondamentale d'économie d'énergie est $DRA = 0.34 \cdot Q_v \cdot \Delta T$. Rapporté sur une année l'équation devient $DRA = 0.34 \cdot \text{degrés jours retenus} \cdot Q_v \cdot (24 \cdot \text{nombre d'heures de ventilation} / 8760) / \text{Rendement}$. On applique un rendement moyen de chauffage de 75% sur le chauffage des radiateurs.*

Chauffage

Nombre d'heures de fonctionnement annuel	2695
Débit horaire en m ³ /h	450
Degrés.jours Toulouse (base 18°C)	2000
Degrés.jours Toulouse corrigé à 20°C sur 200 jours	2400
Energie initiale de chauffage en kWh	2938
Abattement mesuré sur le débit d'air : en %	84%
Economie de chauffage en kWh	2468
Prix du kWh de chauffage par chaudière gaz sur radiateurs	0,057
Economie annuelle de chauffage en Euros	187,5

Le temps de retour sur investissement est de l'ordre de 5 ans. Le calcul officiel aurait pris une base de degrés jours à 20 degrés (2 400), un abattement de 0.52 et un coefficient de réduction de 0.5.

L'économie de chauffage calculée serait de 764 kWh.

On note un décalage important entre les résultats sur site et les résultats conventionnels.

La conception d'une installation de ventilation modulée se réalise suivant les mêmes principes que toutes les installations :

- zonage et définition des besoins par zone.
- choix d'un principe de ventilation (simple et double flux) et de modulation (présence, asservissement).
- définition et dimensionnement du système.

5 - La Conception

5.1 - Zonage et définition des besoins

Le zonage du bâtiment se fait en fonction de l'occupation des locaux (horaires, type) et de leur usage.

Par exemple, un bâtiment de bureaux peut être séparé en zones :

- bureaux, administratif.
- bureaux paysagers.
- sanitaires.
- restauration.
- salles de réunion...

Pour chaque zone, on définit ensuite l'occupation maximale et les débits de ventilation induits selon les réglementations en vigueur. Le tableau ci-dessous reprend quelques valeurs typiques en vigueur à la date de publication.

	Débit en m ³ /h/personne
Bureau	25
salle de réunions*	18/30
Enseignement, jusqu'au secondaire	15
Enseignement, au-delà du secondaire	18
grands magasins, centre commercial	30
salle polyvalente à vocation sportive	30
salle polyvalente à vocation socio-culturelle	30
hôtel chambre moins de 3 personnes	30/chambre
hôtel chambre au moins 3 personnes**	18 ou 25

* RSDT / CDT selon le texte applicable

** non fumeur ou fumeur

Dans certains cas, le débit peut être déterminé par d'autres méthodes, telle qu'une valeur cible en polluant ; c'est typiquement le cas des cuisines ou des parkings.

La modulation permet de réduire les débits lorsque l'occupation est également réduite. On distingue dans l'approche, et pour chaque zone :

- débit hors période d'occupation (nuits, vacances...) : le règlement sanitaire français prévoit de couper la ventilation dans ce cas. Dans certains cas ou certaines zones, le concepteur peut parfois maintenir un débit hors occupation (sanitaires...).
- débit minimum en période d'occupation : le règlement sanitaire prévoit également la possibilité de purger les locaux avant et après occupation. Pour ce faire, il est souvent maintenu pendant les heures d'occupation un débit minimum de ventilation, même en absence d'occupants. Ce débit est pris généralement à 10 % du débit maximal, c'est notamment la valeur qui est requise pour les systèmes ayant passé un Avis Technique.
- débit maximum en occupation permettant de fournir les besoins à occupation maximale.
- Dans le cas d'un mode de chauffage en tout air, il faut maintenir un débit minimal de chauffage du local.

Dans certains cas, on pourra également avoir :

- débit ou mode « boost » : passage à un débit maximum pour améliorer la QAI (odeurs...) par les occupants. Pour éviter des déperditions énergétiques, ce mode doit être temporisé.
- Débit de surventilation : il peut être employé en ou hors période d'occupation pour rafraîchir les locaux (surventilation nocturne l'été et/ou free cooling en mi saison). Si ce débit est employé en période d'occupation, il faudra particulièrement veiller au niveau

sonore induit dans les locaux. Pour chaque débit et besoin, les critères de confort (niveau sonore, vitesse d'air...), seront à déterminer.

5.1.1 - Choix d'un principe

Il existe différents systèmes de ventilation :

- simple flux par extraction : entrées d'air passives, transfert éventuellement, et extraction mécanique.
- Simple flux par insufflation : amenée d'air mécanique, transfert éventuellement et extraction passive (grille, volet de surpression...).
- Double flux : amenée et sortie d'air mécanique, avec ou sans transfert d'air.

A ces systèmes, il faudra également déterminer les principes de modulation : choix du capteur, type d'asservissement.

5.1.2 - Choix du capteur

Le capteur doit être approprié pour suivre correctement le besoin. Le tableau ci-dessous résume quelques capteurs principalement employés. (cf. description chapitre 2.2.1).

Application	Tout ou rien	Asservissement					
	Détection de présence	Optique	CO ₂	Humidité	Température	CO	Autres
Bureaux							
Individuels				NA	NA	NA	
Paysagés				NA	NA	NA	
Salles de réunions							
Petites				NA	NA	NA	
Grandes, amphis...	NA			NA	NA	NA	comptage
Restaurants							
Salle (grande)	NA			NA	NA	NA	
Cuisine		NA	NA			NA	opacité
Lieux publics							
Zone Fumeurs	NA	Selon application (voir ci-dessus)					multigaz*
Hôtel / Habitat							
Sanitaires		NA	NA			NA	
Chambres				NA	NA	NA	
Parkings, garages	NA	NA	NA	NA	NA		multigaz

(*) : différenciation du débit fumeur / non fumeur : un capteur multigaz peut être employé en addition des autres systèmes afin de bien rendre compte de l'occupation réelle.

Particulièrement recommandé Satisfaisant NA Non Adapté

Figure : tableau de sélection des capteurs (Guide pratique sur la modulation des débits de ventilation - CETIAT - 2001, téléchargeable gratuitement sur http://www.cetiat.fr/fr/downloadpublic/index.cfm?docname=guide_modulation.pdf)

Les capteurs les plus employés pour suivre l'occupation humaine sont :

- le CO₂ : c'est un bon traceur de l'occupation humaine et de ces bio-effluents.
- les capteurs optiques : capables de reconnaître des mouvements face à leur lentille. Ils peuvent en déduire soit une présence, soit un nombre d'occupants dans la zone couverte.
- Les capteurs multigaz, dits de QAI. Tous ne sont pas identiques, mais certains réagissent au CO₂, ainsi qu'à quelques activités humaines (tabac, nettoyage...).

- L'humidité est un traceur de l'occupation humaine et de certains usages (cuisine, salles de bains...).

5.1.3 - Type d'asservissement

On distingue :

- Les capteurs de présence qui basculent du débit non occupé au débit maximal.
- Les asservissements, généralement proportionnels, qui font varier progressivement le débit entre ces deux extrêmes.

NB : Un asservissement en échelons (créneaux) pourra être assimilé à un proportionnel, dès lors qu'il présente suffisamment d'échelons.

5.1.4 - Systèmes mono ou multizones

Lorsque le même système de ventilation dessert des zones différentes, il est dit multizones. Chaque zone a son asservissement propre constitué d'un capteur et d'un organe régulant (registre, bouche...).

Le ventilateur doit pouvoir fournir les extrêmes de débit des zones desservies. Pour ceci, différentes régulations peuvent exister :

- Variation de vitesse avec éventuellement un contrôle de pression, situé généralement à 1/3 du réseau principal. Attention dans ce cas aux problèmes d'équilibre sur les terminaux.
- VMC dite à courbe plate lorsque les extrêmes le permettent, et des régulateurs de débit autoréglables sont installés dans le réseau.
- Un système de régulation de débit selon le besoin en ventilation interfère parfois avec la régulation selon le besoin en chauffage climatisation.

L'asservissement dans chaque zone est ensuite assuré par un organe (registre, bouche) s'ouvrant plus ou moins selon le besoin.

Attention : lorsque le nombre de zones desservies est important, des fluctuations de pression sont possibles dans les réseaux.

Une ouverture du registre ne signifie pas alors forcément plus de débit dans la zone.

A contrario, lorsque le système ne dessert qu'un local, il est dit monozone.

La régulation est alors généralement faite directement aux ventilateurs. On préférera la faire par une variation de vitesse performante (variation de fréquence, moteur à courant continu...), et on évitera la fermeture de registre (trop consommatrice en puissance absorbée).

Il faut enfin veiller à ce que dans la gamme des débits possibles pour chaque local, les conditions de confort soient respectées et, notamment :

- niveau sonore à débit min et à débit max.
- Portée et vitesse d'air (aux différences de températures maxi soufflage – ambiance) pour le débit min et le débit max.

Ceci demande souvent :

- d'optimiser la sélection acoustique et diffusion d'air à 80 % du débit maxi (c'est-à-dire à un débit le plus probablement atteint entre le mini et le maxi).
- Valider que les conditions restent acceptables aux extrêmes.

5.1.5 - Régulation et GTC

Une bonne modulation nécessite une bonne gestion :

- du fonctionnement du ventilateur.
- de l'action éventuelle sur les organes de régulation.
- éventuellement des terminaux.

en fonction du signal envoyé pour le ou les capteurs (le plus souvent 0-10 V).

Pour ceci, la régulation peut être intégrée dans la GTC ou gérée par un système autonome.

NB : Une gestion commune éclairage – ventilation est parfois réalisée.

5.1.6 - Nombre de capteurs et réglage

Chaque zone d'usage (fréquentation, activités, horaires) différent nécessite à minima un capteur.

En optique, le positionnement des capteurs est essentiel car ils doivent détecter la présence ou l'occupation.

Ils doivent donc être répartis dans le local en fonction de la zone qu'ils peuvent couvrir selon leur hauteur d'installation. (NB : leur précision peut évoluer avec cette dernière).

L'emploi d'un nombre insuffisant de capteurs peut conduire à des sous-détection ou absence de détection lorsque les occupants sont dans les zones mortes.

En comptage, le fait d'avoir des cônes de détection trop rapprochés (croisés), peut conduire à des sur-détections.

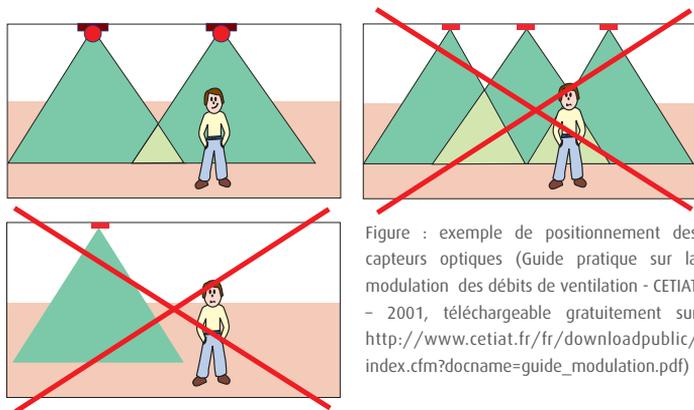


Figure : exemple de positionnement des capteurs optiques (Guide pratique sur la modulation des débits de ventilation - CETIAT - 2001, téléchargeable gratuitement sur http://www.cetiat.fr/fr/downloadpublic/index.cfm?docname=guide_modulation.pdf)

En CO_2 , on considère généralement que le CO_2 se diffuse dans tout le local.

Si on est dans un local étanche, aéré par un réseau de classe A, on peut insérer le capteur dans la gaine de reprise, sous réserve que cette branche ne desserve que cette zone

Lors d'une étude, des mesures de CO₂ ont été réalisées sur un auditorium d'université en gradins de 14 m x 17 m, avec une hauteur sous plafond variant entre 2,65 m et 5,20 m.

La diffusion d'air assurait un brassage de 9 vol/h (à débit maxi). Aucune variation sensible de CO₂ n'a été constatée entre différents points de l'auditorium et la reprise.

Si on considère que le CO₂ se diffuse généralement assez bien, et est donc uniforme dans un local, on peut cependant avoir parfois des gradients de concentration en hauteur, ou des zones mortes. On y prendra notamment garde lorsque les taux de brassage sont faibles, certaines zones mal couvertes par la ventilation ou en cas de diffusion par déplacement d'air (basse vitesse). Pour éviter tout problème, on respectera les règles suivantes :

- capteur installé à moins de 3,50 m du sol et, inaccessible par les occupants si installé dans la pièce
- installation dans le conduit de reprise limité aux cas de ventilation à mélange, pas en déplacement, et seulement dans la partie terminale du conduit qui ne dessert que la zone considérée.
- Un seul capteur par zone est généralement suffisant, sauf en cas de risque de zone morte.

Certains capteurs de CO₂ sont réglables et, notamment le seuil de déclenchement à partir duquel ils enverront un signal proportionnel. Les niveaux de CO₂ extérieurs sont généralement entre 380 et 450 ppm, avec des fluctuations possibles (jour - nuit, saison) de 20 à 50 ppm. Variation de 10 à 30 ppm du principalement aux variations de pression.

Le seuil de déclenchement doit être réglé au-dessus du niveau de CO₂ extérieur maximum pour éviter des déclenchements intempestifs de la ventilation en inoccupation.

Les capteurs de CO₂ peuvent nécessiter un étalonnage sur site pour éviter une dérive trop importante tous les 3 à 5 ans.

Certains capteurs se recalibrent automatiquement. En effet, en inoccupation, le taux minimum atteint correspond assez régulièrement au taux de CO₂ extérieur la nuit en non résidentiel,

qui fluctue peu. Le capteur utilise donc ces périodes pour contrôler et compenser une dérive éventuelle.

5.1.7 - Regroupement des zones en rénovation

En rénovation, il peut être difficile de tirer des câbles dans toutes les zones, et le regroupement de l'action sur plusieurs zones peut être un moyen de commencer à moduler un site de manière raisonnable. Par exemple, un capteur commun à plusieurs zones situé dans le même réseau de reprise donnera une idée de la concentration moyenne dans ces zones, et peut permettre une action sur un registre commun.

Il faut cependant se rappeler que la réglementation exige un débit minimum dans chaque local. Il conviendra donc de s'assurer, pour regrouper des zones :

- soit que ces dernières font partie d'un même local (bureau paysager, plateaux modulaires avec des séparations non étanches...).
- soit que le débit minimal par personne dans chaque local sera respecté (calculé pour les systèmes de conditionnement d'air en fonction du taux d'air neuf admis).

On notera que l'apparition de capteurs sans fil (cf. chapitre 2) pourra faciliter, à l'avenir, le cas de la rénovation ou dans le neuf.

5.2 - Dimensionnement

5.2.1 - Le réseau

Généralement, le réseau est dimensionné à débit maximum.

Le foisonnement implique, pour les systèmes multizones, qu'on puisse rarement atteindre le débit maximum total, du fait des variations d'occupation et donc de débit dans les différentes zones.

Le concepteur pourra juger d'un foisonnement, il est conseillé cependant de raisonner avec prudence, et de considérer peu de foisonnement possible afin de ne pas risquer de sous ventiler les locaux.

5.2.2 - Obtention des critères de confort

C'est le CCTP qui juge des conditions de débit qui sont à prendre en compte pour obtenir les conditions de confort (vitesse d'air, portée, acoustique). Lorsque ce n'est pas indiqué, il faudra les respecter à tous les débits.

NB : Attention, le débit minimum peut être source de chute du jet d'air et de vitesses dans la zone d'occupation, plus gênantes parfois que le débit maximal.

De même, en acoustique, selon les régulations le débit mini peut parfois être le plus défavorable. Il faut donc calculer aux deux extrêmes.

Il est parfois recommandé de dimensionner la diffusion d'air à 70 % du débit nominal pour maintenir des conditions acceptables entre mini et maximum.

5.2.2.1 - Ventilateur et Système d'action

Les trois grands types de régulation conduisent à des dimensionnements différents du ventilateur.

a) variation de vitesse au ventilateur

En système monozone, la variation de vitesse au ventilateur est en général le mode d'action retenu.

La variation de vitesse est également utilisée en système multizone avec un pressostat (cf. 1.2.3) permettant de limiter les fluctuations de pression aux organes régulateurs.

Il existe plusieurs types de variations de vitesses, plus ou moins performants, selon les gammes de variation (amplitude des plages), notamment du point de vue de la consommation électrique (cf. § 3.2.2).

- La variation de tension est généralement limitée aux installations où le débit minimum n'est pas inférieur à 40 % du débit maximum.
- La variation de fréquence permet de descendre, selon les indications des fabricants, jusqu'à environ 30 % du débit nominal.
- Les moteurs à commutation électronique, EC, souvent improprement appelés moteurs à courant continu, permettent le maintien d'un très bon rendement sur l'ensemble de la plage.

b) action sur des registres terminaux

Le dimensionnement du réseau se fait à débit maximal, tous registres ouverts. Il conviendra, cependant, de considérer l'acoustique en position mini du registre.

Selon le nombre de registres et leurs gammes de débit, des fluctuations de pression peuvent apparaître dans le réseau.

Le dimensionnement doit contrôler les différentes conditions de fonctionnement.

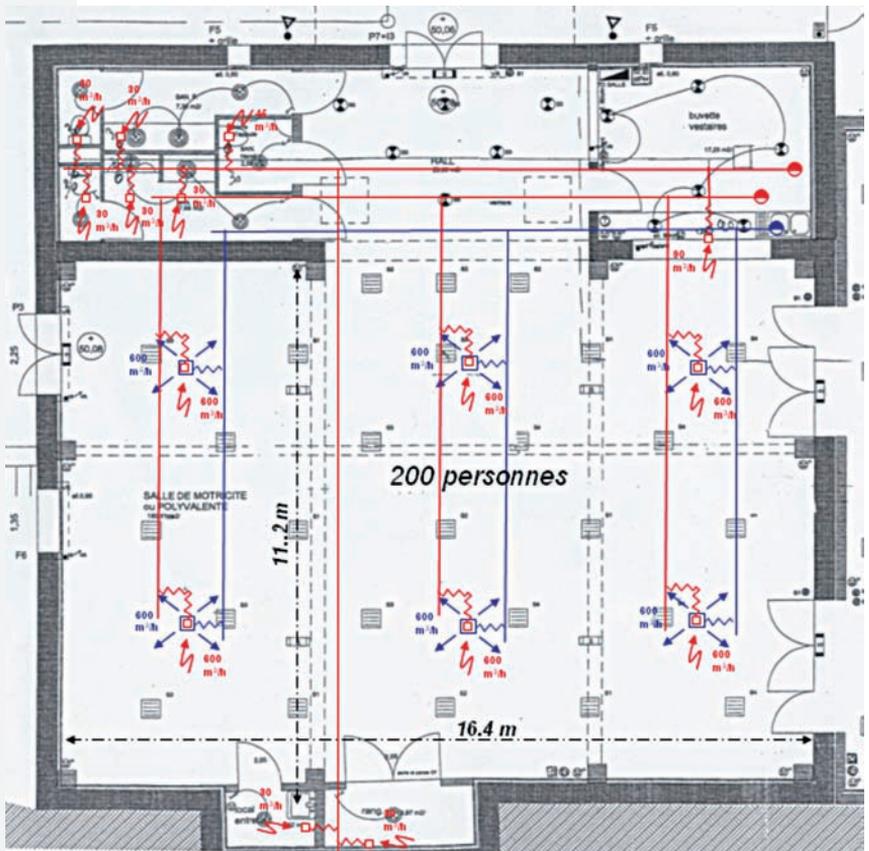
c) usage de registres autoréglables

Lorsque des registres autoréglables sont employés, il conviendra de s'assurer dans tous les modes, que la pression en amont restera dans la gamme de fonctionnement. Pour ceci, le ventilateur sélectionné sera à «courbe plate».

5.3 - Exemples de dimensionnement

5.3.1 - Monozone : salle polyvalente

L'objectif est ici de présenter quels sont les éléments à prendre en compte concernant le dimensionnement du système de ventilation pour une salle polyvalente dont les plans sont présentés ci-dessous :



La première étape est de déterminer les débits d'air à mettre en œuvre conformément au RSDT et au code du travail (article R232-5-3).

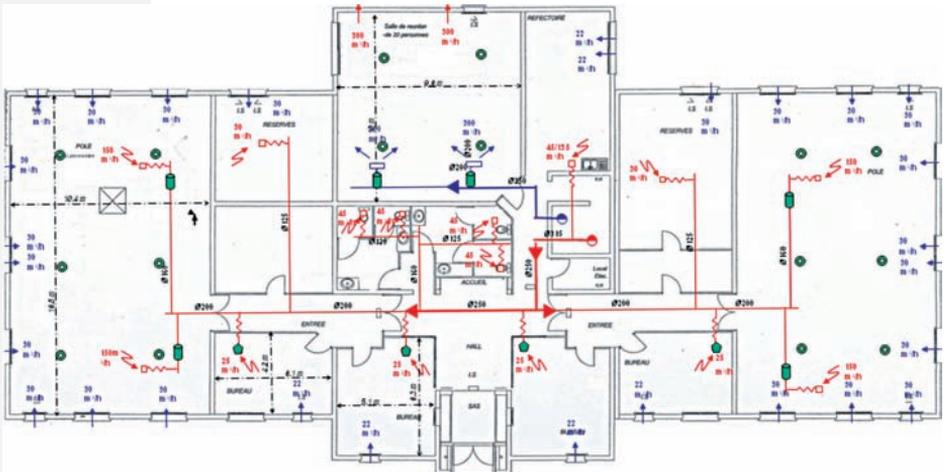
La solution choisie ici est de mettre en place un système de ventilation double flux pour le traitement de la salle et un système simple flux séparé pour la partie sanitaire. Le double flux de la salle sera modulé proportionnellement au taux de CO_2 , ce dernier pris dans la reprise sera représentatif de l'ambiance moyenne dans la salle.

Le tableau ci-dessous permet de récapituler les débits à mettre en œuvre dans chaque local à occupation maximale :

Salle	Débit nominal à 100% d'occupation	
	Amenée d'air	Extraction d'air m3/h
Salle 200 pers.	18 m3/h/pers. = 3600 m3/h	-
Sanitaires femmes	-	30 WC + 30 lavabo
Sanitaires hommes	-	30 WC + 30 lavabo + 30 urinoirs
Sanitaires handicapés	-	45 WC + lavabo
Buvette	-	90 m3/h
Entretien + rangement	-	2 x 30 m3/h
Total extraction	-	345 m3/h

5.3.2 - Multizone : bureau

L'objectif est ici de présenter quels sont les éléments à prendre en compte concernant le dimensionnement du système de ventilation pour un bâtiment de bureau dont les plans sont présentés ci-dessous :



La première étape est de déterminer les débits d'air à mettre en œuvre conformément au RSDT et au code du travail (article R232-5-3). On retiendra deux zones pour la ventilation :

- La salle de réunion qui sera spécifiquement traitée en simple flux par insufflation et modulée selon son usage (proportionnel)

- Les autres locaux qui seront traités par un seul système multizone

Le tableau ci-dessous permet de récapituler les débits à mettre en œuvre dans chaque local ainsi que le système de ventilation retenu selon les zones :

Zone	Salle	Ventilation	Amenée d'air	Extraction d'air
1	Salle de réunion 20 pers.	Simple flux par insufflation modulé spécifique à cette zone (sortie d'air passive isolée)	30 m ³ /h/pers. = 600 m ³ /h	-
	Total Zone 1		600 m ³ /h	0
2.1	2 Bureaux paysagers 12 pers.	Simple flux modulé proportionnel, entrées d'air passives (10 M30/bureau) et extraction dans le bureau sans transfert	25 m ³ /h/pers. = 300 x 2 = 600 m ³ /h	600 m ³ /h
2.2	4 Bureaux individuels	Simple flux modulé présence, 1 entrée d'air M22 et une bouche d'extraction en présence par bureau	25 m ³ /h x 4 = 100 m ³ /h	100 m ³ /h
2.3	2 Réserves	Simple flux fixe (1 M30 et 1 bouche fixe / réserve)	30 m ³ /h x 2 = 60 m ³ /h	60 m ³ /h
2.4	Sanitaires 4 WC+ 4 lavabos	Extraction fixe	-	30 + (15 x N) = 150 m ³ /h
				10 + (5 x N) = 30 m ³ /h
2.5	Réfectoire	Extraction fixe	-	45/135 m ³ /h
	TOTAL Zone 2 Débit nominal (maxi) Débit minimum		760 m ³ /h	1075 m ³ /h 285 m ³ /h

Dans la zone 1, le ventilateur d'insufflation sera directement asservi à l'occupation de la salle de réunion.

Dans la zone 2, on combinera une partie de bouches fixes (réserves, sanitaires, réfectoire), de bouches à détection de présence (bureaux individuels) et de variations proportionnelles (bureaux paysagers).

Le ventilateur sera sélectionné pour fonctionner sur la gamme totale des débits (285-1075 m³/h) et le fonctionnement des différents registres ou régulateurs sera assuré par un contrôle de pression.

6 - Démarches d'installation

6.1 - L'équipement sur du neuf

La ventilation modulée est une option du « lot ventilation » du chantier de construction d'un bâtiment neuf.

Le maître d'ouvrage confie la rédaction d'un cahier des charges au maître d'œuvre, celui-ci pouvant imposer des systèmes de ventilation régulée selon le besoin pour tel type de local.

Si la ventilation régulée selon le besoin n'est pas imposée par le cahier des charges, le bureau d'étude choisira l'option ventilation modulée en fonction du gain énergétique de cette option, calculée selon la RT. Pour un usage bien particulier du bâtiment (par exemple tertiaire bureaux) et pour une technologie donnée (par exemple ventilation modulée à détection de présence, tout ou rien) la réglementation établit un « coefficient de réduction de débit pour des bâtiments non résidentiels » (Crdbnr). Ce coefficient de réduction de débit est un paramètre entrant dans le calcul thermique réglementaire. **Pour du neuf, le calcul du gain énergétique est un calcul forfaitaire et réglementaire qui ne tient pas compte des particularités de l'immeubles, du comportement des usagers, ni des conditions d'exploitation.**

Le bureau d'étude apprécie le gain énergétique forfaitaire de l'option ventilation modulée au regard du surcoût du chantier. Le système choisi doit répondre à un avis technique émis par le CSTB et confirmant le coefficient de gain Crdbnr de la technologie.

Une fois le budget de construction établi, c'est au maître d'œuvre de vérifier la conformité du matériel sur le chantier et le respect des règles d'installation. Après réception du chantier, aucune vérification du gain énergétique ne sera faite.

Pour un chantier de bâtiment neuf, le choix d'une technologie ventilation modulée se fait donc :

- entre des matériels bénéficiant obligatoirement d'un avis technique,

- selon des calculs de réduction de consommation énergétique, réglementaires et forfaitaires, le Crdbnr attribué à la technologie étant le facteur déterminant.

6.2 - L'équipement sur de l'existant

La démarche est alors moins encadrée et plus complexe. Le décideur est le propriétaire de l'immeuble. Dans le tertiaire, le propriétaire peut aussi être l'utilisateur de l'immeuble et le gestionnaire des énergies. L'optimisation de la ventilation est la plupart du temps proposée par un bureau d'étude faisant office de maître d'œuvre ou par une société d'exploitation du bâtiment, selon un contrat privé ou selon une délégation de service publique.

L'exploitant effectue son devoir de conseil en proposant à son client des améliorations destinées à réduire les consommations d'énergie du bâtiment, tout en respectant les critères de confort et la réglementation.

Le choix de la technologie est libre. On notera cependant que les matériels bénéficiant d'un ATEC ouvrent droit à la délivrance de Certificats d'Economie d'Énergie, d'un impact économique encore incertain mais pouvant provoquer un effet d'aubaine.

Par contre, l'équipement se fait avec un retour attendu sur l'investissement. Pour ce type d'opération, le client demande un engagement de résultat sur les économies attribuées au système. Dans le cas où le contrat de service comprend un intéressement sur les économies d'énergie, l'investissement sera fait tout ou partie par l'exploitant. Dans le cas d'un contrat avec vente d'énergie (contrat P1), c'est l'exploitant qui assume l'investissement.

Le choix de la ventilation modulée se fait donc selon des critères économiques. S'il est prouvé que la ventilation modulée apporte des gains en termes de confort acoustique, qualité d'air et maintenance des installations, ces arguments ont peu de poids dans l'analyse purement économique de l'installation, du moins dans le contexte actuel de crise énergétique, relayée par la crise financière.

La rentabilité de l'équipement dépend de ses performances mais aussi de l'usage du bâtiment (heures de fonctionnement par exemple), de son occupation (apports internes, demandes de ventilation), de ses caractéristiques thermiques (déperditions), du fonctionnement des systèmes aérauliques et thermiques adjacents... Ceci implique que l'équipement et les travaux sont précédés d'un diagnostic détaillé, avec une analyse pointue des gains énergétiques atteignables. De même, l'analyse et le reporting des gains réellement obtenus, après installation, étoffent le service délivré autour du matériel.

Sur un bâtiment existant :

- Il n'y a pas de contrainte réglementaire sur le choix du matériel
- L'investissement est fait par l'utilisateur du bâtiment ou la société de gestion maintenance.
- Il se fait en fonction d'une étude économique détaillant les économies d'énergie atteignables sur une période limitée.
- Cette analyse exige un diagnostic pointu du bâtiment et un service étoffé.

6.3 - L'installation du matériel

6.3.1 - Les capteurs de gaz

Pas de gros problèmes avec les capteurs de CO₂ qui est un gaz diffusant très bien dans l'atmosphère. Les précédentes études ont montré que les grandes salles monozones, même celles d'un volume important, ont une concentration homogène en CO₂ (très peu de stratification). Sur ce critère la mesure du CO₂ est significativement plus facile que la mesure de température ambiante.

CO₂

- Positionner le capteur dans un lieu représentatif de la dilution moyenne (dans la zone d'occupation (1,5 m à 1,8 m du sol) ou dans le réseau d'air, proche de l'extraction en diffusion à mélange uniquement) ;
- Eviter les zones de courant d'air (proximité des ouvrants, du soufflage d'air...) et les zones mortes (attention balayage de l'air dans le local) ;
- Eviter la proximité des occupants et des sources de chaleur;

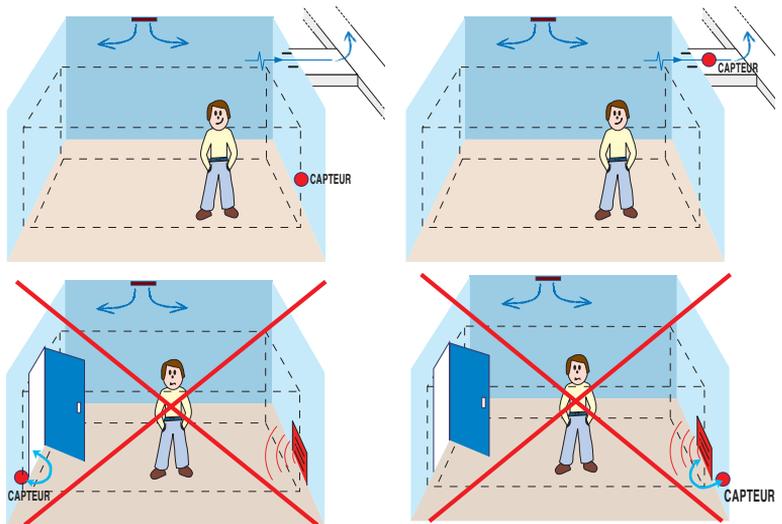


Figure : extrait du guide pratique Modulation du CETIAT, 2001, téléchargeable gratuitement sur www.cetiat.fr

Le choix de l'emplacement est plutôt conditionné par les facilités de câblage (la pose de câble de signal et d'alimentation électrique grève rapidement le budget d'un équipement en ventilation modulée). A cet égard, la solution la plus pratique est souvent l'insertion de la sonde dans un tuyau d'extraction de l'air vicié. Les règles de bon usage interdisent cette configuration si la hauteur des grilles d'extraction dépasse 3.5 m ou en cas de diffusion par déplacement d'air.

Dans tout les cas, il faut vérifier que les diminutions de débit éventuelles ne provoquent pas de court circuit aéraulique plongeant la sonde dans un échantillon d'air non représentatif.

6.3.2 - Les capteurs optiques

Leur emplacement est par nature critique. Il faut placer les capteurs selon les préconisations du constructeur et de l'Avis Technique. L'installation est relativement libre en faux plafond avec dalles légères. Sur du dur, il est parfois difficile d'installer le capteur là où il peut « voir » la présence ou l'agitation. Dans tous les cas, une fois l'installation faite, il faut contrôler le déclenchement du capteur en cas d'occupation. A cet égard, les équipements proposant l'allumage d'une LED à la détection d'un occupant présentent un avantage réel à la réception (et en maintenance).

Que ce soient pour les capteurs optiques ou pour les capteurs chimiques, ces instruments ont une consommation électrique non négligeable (plus de 100 mW) interdisant un fonctionnement par pile. Le recueil de leurs signaux par ondes radio ne solutionne donc pas le problème du câblage. Accessoirement, ces organes ont leur part dans le bilan énergétique de l'équipement...

6.3.3 - Les registres commandés



Photo de registre sur CTA

6.3.3.1 - Les registres en conduit

Nous déconseillons fortement la commande d'un registre existant par un servomoteur ajouté. Ni l'un ni l'autre ne survivent aux ouvertures répétées. Les systèmes industriels avec Avis Technique proposent des kits complets, insérables dans les gaines d'extraction. Ils se révèlent étanches, silencieux. Attention, cependant à la qualité de la coupure dans la gaine et à la qualité du joint avec ces organes. L'installateur doit toujours craindre les fuites parasites annihilant les économies d'extraction.

Une étude d'installation soignée comparera le « nombre moyen d'ouvertures-fermetures du registre » revendiqué par le constructeur à l'utilisation escomptée sur site.

6.3.3.2 - Les registres de volets d'air sur un caisson ou une CTA

L'adjonction d'une commande électrique sur un registre de volets d'air présente le risque de forcer le mouvement des tringleries sur des amplitudes non prévues, avec une détérioration rapide de l'un et de l'autre. Ici encore, on préférera installer un matériel industriel éprouvé.

6.3.4 - La commande des moteurs de ventilation

La ventilation modulée a été portée par les progrès effectués dans le domaine des variateurs électroniques de vitesse des moteurs asynchrones. Cette technologie est plus performante que la modulation de tension en terme des réductions des énergies et de la fiabilité. La gamme de modulation est aussi plus large. Cependant, la technologie à variation de vitesse reste plus coûteuse.



Variateur de vitesse, placé au plus près du caisson de ventilation de la CTA.

Les variateurs électroniques actuels sont petits, on un rendement proche de 100%, perturbent peu le réseau électrique et ont une durée de vie satisfaisante.

A condition toutefois de les protéger des intempéries, de l'eau, des poussières et des surchauffes. On veillera ainsi à ce qu'ils soient installés dans les caissons de ventilation ou dans des armoires industrielles filtrées (et climatisées en cas de moteurs puissants).

L'installateur électricien doit absolument connaître les règles d'installation de ces composants et respecter les distances maximum de tirage de câble ainsi que les impédances préconisées. Le non respect de ces règles est souvent à l'origine de la mauvaise réputation des variateurs électroniques.

Les variateurs électroniques corrompent ils le réseau électrique du bâtiment ?

Cette question entrave parfois la généralisation de la modulation des débits des fluides.

Il faut distinguer les paramètres de qualité du courant.

Un variateur de vitesse moderne augmente significativement le cosinus Phi apparent aux bornes des moteurs. Il diminuera ainsi la part de l'énergie réactive dans le réseau. Sur un site industriel, cette amélioration peut être utile (la part selfique est moins critique sur un site tertiaire).

Les tensions parasites sont quasiment éliminées par l'électronique intégrée aux variateurs. Elles ne posent pas de problème sur une installation moderne.

Par contre, les variateurs génèrent des harmoniques sur le réseau. L'importance du problème dépend du rapport de l'impédance du transformateur alimentant le site sur la somme des impédances des variateurs installés. En clair, le problème n'est significatif que si le bâtiment comprend déjà de nombreux variateurs de puissance (pour situer, environ 20 % de la puissance active installée). Dans ce cas, le rajout de variateurs ne peut se faire sans étude avec un électricien, voire sans un équipement supplémentaire. Cette situation est absolument exceptionnelle dans le cas d'un équipement de ventilation dans le tertiaire.

On évitera de placer les moteurs, avec leur dispositif de régulation de vitesse, dans des endroits trop confinés ou chauds, des combles par exemple. L'échauffement peut y être fatal.

6.3.5 - L'équilibrage des débits ou des pressions

C'est le problème le plus complexe à traiter pendant ou après l'installation. La modulation de débit dérègle le système aéraulique qui a été réglé pour une vitesse nominale. En conséquence, l'air hygiénique peut ne plus être insufflé partout où il l'était à vitesse nominale. Si la salle est en chauffage tout air, le problème se complexifie mais il devient plus criant, les occupants demeurant plus sensibles aux variations de température qu'aux variations de qualité d'air.

6.3.5.1 - Equilibrage dans une salle monozone

Dans ce cas, la modulation de débit, en sortie de caisson de soufflage, se fait sur les ventilateurs. Aucune action n'est faite sur les gaines terminales ni sur les bouches de diffusion.

L'air n'arrive cependant pas sur toutes les bouches avec la même vitesse. L'air arrivant sur les bouches les plus éloignées du caisson a subi des pertes de charges plus importantes. Le débit y est moindre. Pour compenser, on règle ces bouches en diminuant leur résistance de sortie.

L'autre problème est celui de la vitesse d'air en sortie des bouches, en espérant que cette vitesse soit homogène d'une bouche à l'autre. En diminuant le débit, la vitesse d'air risque de ne plus être suffisante pour descendre jusqu'au sol, et cela d'autant plus que l'air diffusé est plus chaud que l'air ambiant. Le risque de by-pass aéraluque est augmenté, surtout si l'extraction se fait en haut de salle.

Quelle solution ?

Si les bouches de diffusion ne sont pas équipées de réglage automatique d'orientation du jet en fonction de la pression, aucun réglage fixe n'est satisfaisant. Ajoutons que ce type d'équipement, cher et délicat, est très rare.

Pour être très clair, on ne ventile bien qu'au point d'équilibre. Le quel choisir ?

Nous conseillons de positionner la diffusion de l'air pour une vitesse maxi (en diffusion horizontale).

Si la salle est vide, la ventilation est assurée.

Si la salle est pleine, on souffle un air plus froid que l'air ambiant. Il aura donc tendance à descendre rapidement, même avec un jet horizontal. Cette situation donne satisfaction...la plupart du temps.

Dans le cas d'une ventilation modulée avec chauffage tout air et rafraîchissement tout air, le compromis pour toute saison est impossible. Il faut au moins changer de réglage deux fois dans l'année.

En fonctionnement, l'opérateur dispose de plusieurs solutions pour vérifier que l'air arrive bien partout où doit arriver :

- Calcul ou simulation
- La visualisation des flux par fumigène. Très concret mais il faut un matériel conséquent (éclairage puissant pour de grands volumes).
- La mesure de la QAI et de la température, à hauteur d'homme et ambulatoire.

C'est cette solution qui est retenue et qui relativise le problème, en général....

6.3.5.2 - Equilibrage dans le réseau aéraulique

Pour les cas où la modulation du débit se fait en tout ou rien ou en continu dans les branches terminales du réseau ou dans les bouches de diffusion.

Si la fermeture se fait en tout ou rien, on évite dans chaque salle les problèmes de diffusion évoqués plus haut.

Mais on risque alors l'effet clarinette : si je ferme un trou, l'air qui n'y passe plus passe par un autre trou ! Au total, l'économie de renouvellement d'air est nulle et on génère plus de bruit dans les salles occupées.

Une première solution consiste à équiper les caissons avec des ventilateurs à action (courbes plates) pour lesquels le débit varie peu avec la pression. Ce type d'équipement est valable si moins de 30 % du débit total est susceptible d'être interrompu par fermeture de registre.

Au-delà, il faut asservir le moteur de ventilation à la pression mesurée dans le réseau. On se retrouve alors dans le cas d'une ventilation multizone modulée selon la pression. Ce type de système est connu des bureaux d'étude (VAV avec caisson de détente). On sait que le problème est alors l'emplacement du capteur de pression. La réponse habituelle est de placer le capteur à une distance d'un tiers de la longueur du réseau.

Dans les faits, on place le capteur où on peut, le plus souvent au plus près du caisson. L'installateur se souviendra de la fragilité de ce critère lors de la réception, en tendant l'oreille sur les bouches de diffusion restées ouvertes quand d'autres se ferment. Un sifflement intempestif est le signe d'un déséquilibre mal compensé par la mesure de pression.



Ventilation schématisée d'une grande salle de réunion avec des apports importants et un gradient de température significatif. L'air pulsé à grande vitesse parvient à vaincre le gradient de température et à descendre avant d'être extrait par les grilles de diffusion.



Pour une vitesse d'air réduite de moitié en sortie de bouche de diffusion, l'air chaud ne descend pas jusqu'aux fauteuils et est directement repris par les grilles de diffusion. L'inconfort thermique ne sera pas décelé par une sonde de température placée en reprise.

7 - La réception

Les différents composants ont été décrits avec leur contrôle en installation.

On vérifiera le fonctionnement des capteurs. Pour les capteurs optiques, cette vérification est visuelle. Pour les capteurs de CO₂, on ne peut que contrôler le signal en innocupation mais c'est une information utile.

La réception du chantier peut comprendre le fil à fil, l'inventaire des points etc.... Mais il sera toujours très difficile de contrôler le fonctionnement réel de la régulation. Un bon compromis est l'enregistrement des variations d'intensité électrique consommée par l'un des moteurs de ventilation. En comparant ces variations aux variations d'influence, il sera facile de détecter un problème.

Si le fonctionnement aéraulique pose rarement des problèmes, l'interaction avec la gestion climatique du bâtiment est souvent complexe et longue à régler.

Un seul exemple : la ventilation modulée est conçue pour réduire les consommations énergétiques du bâtiment. Ceci implique de changer la courbe de chauffe des bâtiments régulés en boucle ouverte (l'immense majorité des bâtiments). Même si la ventilation n'assure pas le chauffage (chauffage en tout air), une option ventilation modulée agit obligatoirement sur la conduite climatique du bâtiment. Pour cette raison, il est souvent préférable, voire indispensable, que l'exploitant climaticien du bâtiment soit impliqué dans la réception de la ventilation modulée.

8.1 - L'entretien préconisé par les constructeurs de matériel avec Avis Technique

Les Avis Techniques présentent des conseils d'entretien simples et peu exigeants, préconisations rassurantes que l'utilisateur confirme.

- Les registres d'air, tout ou rien, tout ou peu, ou proportionnels : entretien identique à celui des installations aérauliques traditionnels.
Une fois par an.
 - Commentaires de l'utilisateur : les composants aérauliques ne sont pas tous nettoyés une fois par an. Ces composants supportent bien l'encrassement. Par contre, les moteurs électriques des registres peuvent lâcher, sans qu'il soit possible de le détecter.

- Bouches d'extraction à fermeture électrique : entretien identique à celui des installations aérauliques traditionnels. Nettoyage au chiffon humide, contrôle visuel de l'ouverture du volet.
 - Commentaires de l'utilisateur : ces composants, apparentés aux détecteurs d'intrusion à infra rouges ne posent pas de problème. L'éventuelle défaillance du moteur est visible. Toujours préférer une alimentation électrique à une alimentation à pile, qui pose un problème de maintenance.

- Variateurs de fréquence : dépoussiérer le variateur, le protéger des surchauffes. Durée de vie annoncée : 3 à 5 ans.
 - Commentaires de l'utilisateur : le variateur ne doit pas être empoussiéré. Attention aux problèmes électriques en cas de forte puissance. Ne pas descendre trop en fréquences imposées aux ventilateurs. Ces conditions respectées, la durée de vie de l'ensemble dépasse les 5 ans.

- Variateurs de tension pour moteurs monophasés : aucun problème.
 - Commentaires de l'utilisateur : installation facile mais, selon nous, cet asservissement présente plus de risque que les variateurs de fréquence, surtout si on diminue trop la vitesse des moteurs (cf. chapitre 5.2.2.1)..

- Capteurs de présence ou d'agitation : nettoyer la lentille avec un chiffon doux.
 - Commentaires de l'utilisateur : ces composants, apparentés aux détecteurs d'intrusion à infra rouges ne posent pas de problème.
Toujours préférer une alimentation électrique à une alimentation à pile, qui pose un problème de maintenance.

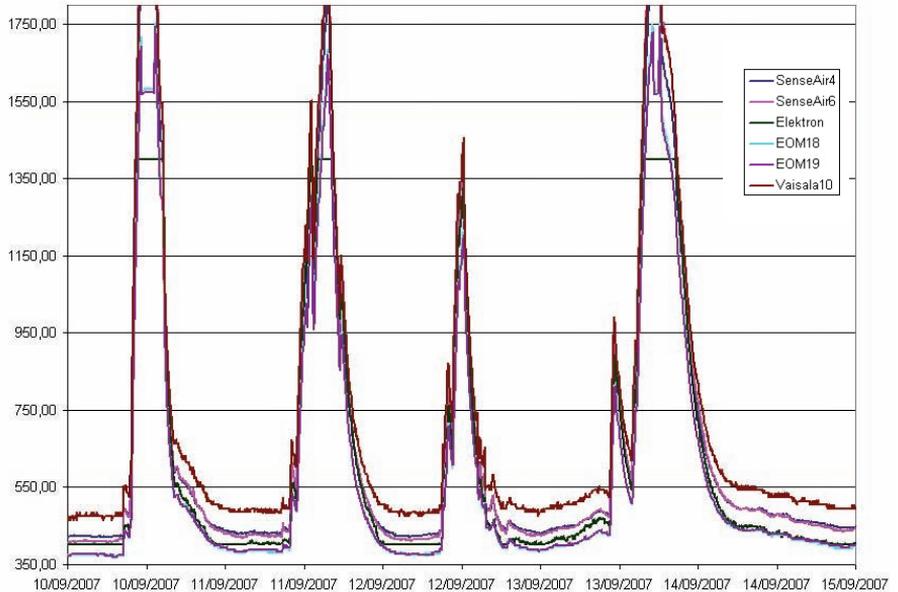
8.2 - Le cas particulier des capteurs de CO₂

Les capteurs de CO₂ effraient beaucoup d'utilisateurs ou de bureaux d'étude. Des problèmes de dérives sur les précédentes générations ont semé le doute. Une dérive de capteur se traduit directement par une surconsommation énergétique ou un défaut de ventilation.

Ces craintes sont révolues. Ces capteurs, du moins certaines marques, présentent aujourd'hui des qualités métrologiques et d'exploitation remarquables. Une étude cofinancée par l'ADEME confirme ces qualités instrumentales.

Certaines marques de capteurs utilisent une qualité remarquable de leur mesurande : le CO₂ est stable dans l'atmosphère et offre un très bon étalon. Même en atmosphère urbaine, les variations de concentrations ne dépassent pas 50 ppm. Certains appareils profitent de cet étalon naturel pour s'étalonner automatiquement. D'autres utilisent des techniques optoélectroniques interdisant toute interférence et permettant donc un calage facile de l'absorption infra rouge.

Ces qualités autorisent un fonctionnement continu, sans dérive apparente. Nous avons l'expérience de plusieurs capteurs installés en continu depuis 5 ans, sans qu'une dérive ne puisse être détectée.



On observe cependant des décalages dans le cas suivant : arrêt du capteur dans un flux d'air humide et froid favorisant la condensation dans le chemin optique du capteur. Au démarrage, le décalage de signal peut être conséquent.

Entretien : aucun. Il vaut mieux laisser ces capteurs toujours allumés.
Durée de vie : pas assez de recul pour une quantification précise mais on peut avancer sans risque une durée de vie moyenne supérieure à 3 ans.

Étalonnage : il vaut mieux parler de vérification. On conseille de vérifier les capteurs une à deux fois par an. La procédure est facile. Pour des capteurs se situant dans cette gamme de prix, avec une durée de vie supérieure à 3 ans, une société de maintenance préfère assurer une rotation systématique plutôt qu'un étalonnage sur site (cf. annexe).

9.1 - Procédure d'essais des capteurs sur site

9.1.1 - Les capteurs optiques

Aucune étude n'a démontré une dérive de sensibilité ou une variation de l'angle solide de détection au cours du temps d'utilisation.

On en déduit que ces capteurs ne présentent pas de dérive et n'ont pas besoin d'être évalués sur site.

On peut constater cependant des pannes de ces composants ou des problèmes d'alimentations électriques. On retiendra en particuliers les capteurs alimentés sur batterie qui sont un gage certain de défaillance... à plus ou moins long terme.

Le personnel de maintenance se livrera donc à un contrôle annuel ou bi annuel des capteurs optiques, permettant de contrôler le fonctionnement en tout ou rien. La procédure est assez simple : le personnel provoque un déclenchement certain du capteur (en agitant son bras directement sous sa vision) et observe le basculement de l'alerte. Pour ce faire, il est indispensable qu'une diode lumineuse signale la détection. Cet équipement est un élément important de sélection du composant.



Capteur optique de présence installé sur faux plafond. Dans ce cas, l'opération de maintenance consistait à changer les batteries, après la constatation de l'arrêt de fonctionnement.

Il n'y a pas de procédure validée permettant de mesurer qualitativement, sur site, les performances du capteur. Rappelons que l'entretien se résume à un nettoyage au chiffon humide.

9.1.2 - Les capteurs CO₂

Ce sont des capteurs analogiques délivrant une mesure proportionnelle au mesurande à asservir.

Les études démontrent :

- Une bonne fiabilité : pas de panne sauf problème d'alimentation électrique.
- Une très bonne linéarité autorisant un ajustement en 1 ou deux points.
- Pas de dérive sur plusieurs années, s'ils sont en fonctionnement continu.

Néanmoins, comme tout capteur analogique, celui-ci doit être contrôlé sur site.

On vérifiera ainsi son alimentation électrique et l'acquisition du signal analogique, la boucle 4-20 mA étant toujours plus significative, à cet égard, que le signal 0-10 V.

La mesure du CO₂ a un avantage certain. Elle dispose d'un étalon universel : la teneur fixe en CO₂ dans l'atmosphère extérieure. La moyenne annuelle de la concentration en CO₂ était en 2007 de 385 ppm, avec un accroissement de 2 % par an. Bien sur, c'est une moyenne, mais les études ne révèlent pas de disparité géographique importante. Même en milieu urbain dense (périphérie parisienne), la teneur en CO₂ ne varie pas de plus de 50 ppm d'un jour à l'autre. Ces variations se situent de toutes façons dans les écarts de variations saisonnières (-40 ppm en moyenne estivale par rapport à l'hiver). Pour un capteur calibré entre 0 et 2000 ppm, on peut dire que l'on dispose d'un étalon précis à 390 ppm. Un ajustement en un point sur la concentration extérieure permet d'obtenir une droite de sensibilité avec une erreur à 10 %.

La manipulation est aisée : il suffit de comparer la mesure du signal à 400 ppm, quand la salle est vide. Un piège cependant : le temps de purge d'une salle. Compter un délai suffisant (dépendant du taux de ventilation en Vol/heure) pour parfaitement purger une salle et atteindre les 400 pm. Pour ne pas prendre de risque, prendre la mesure au petit matin après une nuit de ventilation, salle vide.



Mesure de CO_2 après une purge de la salle, par deux capteurs. Dans ce cas, on obtient le palier correspondant à l'atmosphère extérieure, 8 heures après la désertion de la salle, avec un taux de renouvellement d'air de 3 Vol/heure.

Un étalonnage plus précis peut être fait par intercomparaison avec un capteur nomade étalon. On dispose alors de plusieurs points. Attention dans ce cas aux problèmes de corrélations entre deux capteurs pouvant être décalés dans le temps. A noter que les équipementiers d'instrumentation climatique proposent des capteurs enregistreurs portables fiables et précis.



Enregistreur nomade pouvant mesurer l'humidité, le CO₂ et la température de l'air.



air·h
ASSOCIATION INITIATIVE RÉGLEMENTATION HYGIÈNE