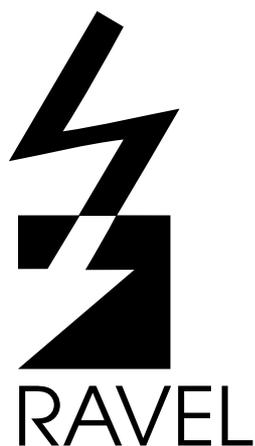


Installations de ventilation énergétiquement performantes



Installations de ventilation énergétiquement performantes

Les études de cas effectuées dans le cadre du projet RAVEL montrent que les installations de ventilation énergétiquement très performantes occasionnent jusqu'à huit fois moins de frais en électricité que des installations dimensionnées selon des critères traditionnels.

De telles installations ne permettent pas seulement de diminuer les frais d'exploitation, mais coûtent aussi souvent nettement moins cher.

Quelles sont les étapes à franchir pour réaliser la planification d'une installation énergétiquement performante? Quelles sont les exigences posées à ces installations par les recommandations SIA V382/1-3? Comment améliorer l'écoulement de l'air dans les installations? Comment éviter le surdimensionnement des moteurs ou des ventilateurs? Quels sont les nouveaux systèmes – par exemple refroidissement des dalles en béton, registre terrestre à air, sonde géothermique – qui peuvent aider à diminuer la consommation d'électricité?

Le présent document répond à ces questions et donne des indications concrètes sur les points à observer lors de la planification des installations et le choix des composants. Il indique en outre aux architectes et aux maîtres de l'ouvrage à quel moment de la planification faire appel au spécialiste en ventilation, mais aussi l'influence d'une bonne planification sur le confort et la consommation d'énergie.

De plus, cette documentation montre à l'utilisateur comment, par des mesures bon marché, diminuer la consommation d'énergie.

Des aide-mémoire sur les thèmes « Conception du bâtiment », « Conception des installations de ventilation et de climatisation », « Conception de composants particuliers », « Exploitation des équipements » complètent cette documentation et en font un outil de travail quotidien fort utile.

ISBN 3-905233-53-3

Edition originale : ISBN 3-905233-40-1

1994, 154 pages

N° de commande 724.307 f

Installations de ventilation énergétiquement performantes



Programme d'impulsions RAVEL
Office fédéral des questions conjoncturelles

Associations de soutien

ASCV	Association suisse des entreprises de chauffage et de ventilation
Astech	Association des techniciens en chauffage, climatisation et froid
SBHI	Ingénieurs-conseils suisses de la technique du bâtiment et de l'énergie
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
SICC	Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation
UTS	Union technique suisse
UVACIM	Union vaudoises des associations commerciales, industrielles et des métiers

Direction du projet

Urs Steinemann, Ingenieurbüro US
8832 Wollerau

Auteurs

Anton De Martin, Aicher De Martin Zweng AG
6006 Luzern

Robert Meierhans, Meierhans & Partner AG
8117 Fällanden

Urs Steinemann, Ingenieurbüro US
8832 Wollerau

Préparation du projet

- Thomas Baumgartner, Ingenieurbüro für Haustechnik, 8600 Dübendorf
- Fritz W. Berg, ABB Normelectric AG, 8953 Dietikon
- Christophe Brunner, E + B Concept, 1113 St-Saphorin s/Morges
- Rudolf Furter, ZTL, 6048 Horw
- Heinrich Gugerli, INTEP, 8034 Zürich
- Werner Hochstrasser, Hochstrasser Consulting AG, 8152 Glattbrugg
- Miklos Kiss, Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, 8022 Zürich
- Jürg Nipkow, ARENA, 8006 Zürich
- Erich Schadegg, Gruenberg & Partner AG, 8027 Zürich
- Bendicht Schütz, ZTL, 6048 Horw
- Heinz Villa, Amt für technische Anlagen und Lufthygiene, 8090 Zürich
- Charles Weinmann, Weinmann-Energies SA, 1040 Echallens
- Daniel Wolfisberg, Team-Kader AG, 6304 Zug

Traduction et adaptation de la version française

Christophe Brunner, E + B Concept,
1113 St-Saphorin s/Morges

Mise en page et composition

Consortium Dac/City Comp SA
Morges et Lausanne

Copyright © 1994 Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, mai 1994.

Reproduction d'extraits autorisée avec indication de la source.

Diffusion : Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne (Numéro de commande 724.307 f)

Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-95), le programme d'action « Construction et Energie » se compose des trois programmes d'impulsions suivants :

- PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions
- RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité
- PACER – Energies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Leur but est de favoriser une croissance économique qualitative. Dans ce sens ils doivent conduire à une plus faible utilisation des matières premières et de l'énergie, avec pour corollaire un plus large recours au savoir-faire et à la matière grise.

Le programme RAVEL cherche principalement à améliorer la compétence des professionnels à utiliser l'énergie électrique à bon escient. Outre les aspects de la sécurité et de la production, qui étaient prioritaires jusqu'ici, il est aujourd'hui indispensable de s'intéresser davantage aux rendements. RAVEL a établi une matrice de consommation qui définit dans leurs grandes lignes les thèmes à traiter. Les procédés utilisés dans l'industrie, le commerce et le secteur tertiaire sont à considérer parallèlement aux utilisations de l'électricité dans les bâtiments. Dans ce contexte, les groupes-cibles concernés sont les spécialistes de tous les niveaux de formation et les décideurs qui doivent gérer les investissements en matière d'équipements et de procédés.

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc.

Les objectifs de RAVEL sont poursuivis par des projets de recherche et de diffusion des connaissances de base, par des cycles de formation et de perfectionnement, ainsi que par l'information. Le transfert des nouvelles connaissances est orienté vers une mise en pratique dans le travail quotidien. Il repose principalement sur des publications, des cours et des réunions. Une journée d'information annuelle RAVEL permet de présenter et de discuter des nouveaux résultats, développements et tendances de cette discipline fascinante qu'est l'utilisation rationnelle de l'électricité. Les personnes intéressées trou-

veront dans le bulletin « Construction et Energie » de plus amples informations sur le vaste éventail des possibilités en matière de formation continue offertes aux groupes-cibles. Ce bulletin paraît trois fois l'an et peut être obtenu gratuitement en s'adressant à la Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne. En outre, chaque participant à un cours, ou autre manifestation du programme, reçoit une publication spécialement élaborée à cet effet. Toutes ces publications peuvent également être obtenues en s'adressant directement à la Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne.

Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des divers domaines concernés ; ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles, ou aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission qui comprend également des représentants des associations, des écoles et des branches professionnelles concernées.

Ce sont les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des autres activités proposées. Pour la préparation de ces activités, une direction de projet a été mise en place ; elle se compose du Dr Roland Walthert, de M. Werner Böhi, du Dr Eric Bush, de MM. Jean-Marc Chuard, Hans-Ruedi Gabathuler, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, du Dr Daniel Spreng, de M. Felix Walter, du Dr Charles Weinmann et de M. Eric Mosimann de l'OFQC. Une très large part des activités est confiée à des groupes de travail qui sont responsables du contenu, de même que du maintien des coûts et des délais.

Documentation

La présente documentation traite des principaux aspects dont il faut tenir compte lors de la planification, de l'exploitation et de l'entretien d'installations de ventilation et de climatisation, afin que les conditions ambiantes prévues puissent être satisfaites en utilisant un minimum d'énergie. Les

auteurs ont également attaché beaucoup d'importance à présenter les dernières connaissances et les nouveaux développements. Il faut mentionner par exemple les recommandations SIA V382/1-3 publiées en 1993, les connaissances tirées du programme de recherche « Ventilation et énergie dans le bâtiment » (VEB), ainsi que divers autres nouveaux systèmes et composants.

Le présent document a fait l'objet d'une procédure de consultation; il a également été soumis à l'appréciation des participants lors d'un cours pilote, ce qui a permis aux auteurs d'effectuer les corrections nécessaires. Ceux-ci ont toutefois

gardé leur liberté d'appréciation pour les questions où les avis divergeaient. Ils assument donc aussi la responsabilité de leurs textes. Des améliorations sont encore possibles et des suggestions éventuelles peuvent être adressées soit à l'Office fédéral pour les questions conjoncturelles, soit au directeur de projet responsable (voir p. 2).

Office fédéral des questions conjoncturelles
Service de la technologie

Dr B. Hotz-Hart
Vice-directeur

1. Contenu et but de la documentation

1.1	Contexte, domaine d'application	11
1.2	But de la documentation	11
1.3	Comment utiliser cette documentation	11
1.4	Autres documents et projets	12
1.4.1	Normes et recommandations SIA	12
1.4.2	Programme de recherche VEB	13
1.4.3	Publications	15
	Bibliographie chapitre 1	15

1. Contenu et but de la documentation

1.1 Contexte, domaine d'application

Différentes études montrent qu'on ne peut pas négliger la consommation d'électricité des installations de ventilation. Grâce, en particulier, aux activités du programme d'impulsion RAVEL, plusieurs installations ont pu être mesurées et analysées. Certaines servent d'exemples lors du cours donné en relation avec cette brochure. Les exemples font l'objet d'une documentation séparée remise aux participants pendant le cours [1.7]. On constate que pour des bâtiments dont l'affectation et les exigences en matière de ventilation sont similaires, la consommation d'électricité varie beaucoup. Cela laisse entrevoir un très grand potentiel d'économie pour beaucoup d'installations existantes. La commission SIA 380/4 « L'énergie électrique dans le bâtiment » travaille sur les exigences fondamentales à formuler en matière de consommation d'électricité en fonction de l'utilisation d'un bâtiment. Le premier projet de cette recommandation SIA a subi une phase test jusqu'à fin 1992 et est retravaillé actuellement [1.1].

La présente brochure, ainsi que les autres documents du programme d'impulsion RAVEL et la recommandation SIA 380/4 devraient à l'avenir aider à diminuer la consommation d'électricité des installations de ventilation en Suisse, qu'elles soient neuves ou existantes. Le contenu de la brochure s'applique en premier lieu aux installations de ventilation et de climatisation de locaux habités (bureau, administration, salle de réunion, école, habitation, etc.). Il est largement possible et souhaitable de l'appliquer par analogie aux installations spéciales telles qu'industries, hôpitaux, équipements routiers, restaurants, protection civile, etc., pour autant qu'on tienne compte des exigences particulières de ce type d'installations. Les questions relatives à la production du froid ne sont pas traitées par ce document.

1.2 But de la documentation

La documentation passe complètement en revue les différents aspects des installations de ventilation ayant une influence sur la consommation d'électricité. Elle est destinée en premier lieu à ceux qui s'occupent de planification d'installations de ventilation. Beaucoup d'informations pourront aussi être utiles aux fabricants, aux architectes, aux maîtres d'ouvrages et aux exploitants.

1.3 Comment utiliser cette documentation

Au début de la brochure, les pages 5 et 6 présentent une table des matières générale offrant la vue d'ensemble des thèmes abordés. Chaque chapitre commence ensuite par une table des matières spécifique et se termine par une liste de publications se rapportant aux thèmes traités. Un résumé des notions principales se trouve au début de chaque sous-chapitre important.

Dans bien des cas, les aide-mémoire du chapitre 7 s'avèrent également très utiles pour avoir un premier aperçu. Ils concernent les thèmes suivants:

- Conception du bâtiment.
- Conception des installations de ventilation et de climatisation.
- Conception de composants particuliers.
- Exploitation des équipements.

1.4 Autres documents et projets

1.4.1 Normes et recommandations SIA

La société suisse des ingénieurs et des architectes a publié trois recommandations qui traitent des installations de ventilation et de climatisation :

Recommandation SIA V382/1

« Performances techniques requises pour les installations de ventilation et de climatisation » [1.2]

- Désignation des flux d'air et des types d'installations.
- Performances requises pour les installations de ventilation et de climatisation, tenant compte des questions de confort, d'hygiène et de consommation d'énergie.
- Définition des valeurs de garantie et procédure de réception.
- Indications générales pour la planification et l'exécution d'installations de ventilation et de climatisation.

Recommandation SIA V382/2

« Puissance de réfrigération à installer dans le bâtiment » [1.33]

- Procédure de calcul pour le dimensionnement des installations, afin de garantir le conditionnement des locaux.
- Indications concernant les principales conditions et charges thermiques externes.
- Valeurs typiques de charges thermiques internes.

Recommandation SIA V382/3

« Preuve des besoins pour les installations de ventilation et climatisation » [1.5]

- Preuve du besoin pour une réfrigération de l'air (y compris mesures constructives requises).

- Preuve du besoin pour une humidification de l'air.
- Conditions cadres pour installations énergétiquement performantes.

Une première édition des recommandations SIA V382/1 et V382/3 fut publiée en avril 1989 et soumise à une consultation prolongée jusqu'à fin 1991. La nouvelle édition de 1992 tient compte des expériences ainsi faites et des nouvelles connaissances acquises dans l'intervalle.

La recommandation SIA V382/2 remplace la documentation SIA D 70 « Kühlleistungsbedarf von Gebäuden » (en allemand seulement) de 1983. Une description complète des méthodes de calcul utilisées dans SIA V382/2 se trouve dans la documentation SIA D 088 [1.4].

Les recommandations SIA V382/1, V382/2 et éventuellement aussi V382/3, seront remplacées dans quelques années par les normes européennes CEN. Les travaux correspondants CEN/TC 156 sont effectués en collaboration avec la Suisse. C'est pourquoi, les trois recommandations SIA ont été publiées en version V (jaune). Elles correspondent à l'état actuel des connaissances et doivent être utilisées jusqu'à la parution des normes respectives du CEN.

La recommandation SIA 380/4 devrait fortement contribuer à faire diminuer la consommation d'électricité des bâtiments :

Recommandation SIA 380/4

« L'énergie électrique dans le bâtiment » [1.1]

- Détermination préalable de la consommation d'électricité.
- Meilleures valeurs et valeurs cibles pour juger la consommation d'électricité calculée ou mesurée.
- Mise en place et suivi d'un budget énergétique.
- Directives de planification et d'exploitation.

Le projet de la recommandation SIA 380/4 a subi une phase d'essai jusqu'à fin 1992 (paragraphe 3.5).

1.4.2 Programme de recherche VEB

Le programme de recherche « Ventilation et énergie dans le bâtiment » (VEB - ERL en allemand) fut développé en 1985 ; sa réalisation a débuté en 1986. Les thèmes principaux du programme de recherche sont le transport de l'air et des polluants à l'intérieur des bâtiments et dans leur environnement immédiat, plus particulièrement sous l'aspect énergétique.

Le but de ce programme de recherche VEB est de mettre à disposition des planificateurs des instruments de travail qui leurs permettent de déterminer, déjà dans les phases de planification, tous les paramètres déterminants de la circulation de l'air dans et autour du bâtiment, pour :

- garantir le bien-être, le confort et la sécurité des utilisateurs ;
- concevoir des systèmes de ventilation et de chauffage ayant un bon rendement ;
- exploiter au maximum le rayonnement solaire et les apports de chaleur ;
- utiliser l'énergie de façon optimale.

On a particulièrement tenu compte des conditions climatiques et météorologiques propres à la

Suisse ainsi que des types de constructions en usage dans notre pays.

Pour atteindre ces buts, il a fallu procéder de la façon suivante :

- Description mathématique du transport de l'air et des polluants à l'intérieur d'un local ou entre les différentes zones d'un bâtiment.
- Préparation de méthodes de mesure de la vitesse de l'air, de ses variations, de la température de l'air et de la concentration en substances nocives.
- Description de divers systèmes de ventilation, chauffage et climatisation pour différents types de bâtiments.
- Transposition des résultats en documents de planification pouvant, dans la mesure du possible, être utilisables sans moyens informatiques lourds.

La publication de la collection documentaire VEB en sept volumes (voir tableau 1.1) est la transposition, dans la pratique, des nombreux résultats du programme de recherche VEB. La vente de ces documents se fera dès début 1994 par l'ASCV.

N°	Titre	Contenu
VEB 1	Vue d'ensemble VEB	<ul style="list-style-type: none"> - Introduction, contexte - Objectifs - Organisation et déroulement (coordination, organigramme, budget, déroulement) - Travaux et résultats des différents domaines (résumé) - Diffusion (concept, groupes cibles, manifestations, documentation pour la pratique) - Perspectives (prestations, projets futurs)
VEB 1A	Annexe	<ul style="list-style-type: none"> - Liste des différents projets - Liste des institutions associées au projet - Liste des publications - Liste des abréviations
VEB 2	Lexique de la ventilation	<ul style="list-style-type: none"> - Lexique des notions importantes en ventilation - Liste des mots spécifiques à la branche - Bibliographie

N°	Titre	Contenu
VEB 3	Aéraulique Bases physiques	<ul style="list-style-type: none"> - Introduction - Physique de l'écoulement de l'air dans un local (notions fondamentales) - Ecoulement de l'air dans le local - Echanges d'air et d'impuretés entre les différentes zones d'un bâtiment et entre le bâtiment et l'extérieur - Echanges thermiques avec l'enveloppe du bâtiment - Confort thermique et qualité de l'air - Critères pour jauger les systèmes de ventilation - Bibliographie
VEB 4	Atlas de la ventilation	<ul style="list-style-type: none"> - Introduction - Bases numériques et physiques - Types d'écoulement d'air pour différents systèmes de ventilation - Structure de l'atlas - Interpolation des résultats et étude de sensibilité - Bibliographie
VEB 4A	Annexe	<ul style="list-style-type: none"> - Atlas avec marche à suivre pour systèmes à déplacement d'air (Quellüftung) et à induction
VEB 5	Programmes de calcul des flux d'air dans les bâtiments	<ul style="list-style-type: none"> - Introduction - Vue d'ensemble et marche à suivre - Modèles monozones - Modèles multizones - Couplages entre modèles monozones et multizones
VEB 5A	Annexe	<ul style="list-style-type: none"> - Exemples de calcul avec le programme multizones - Exemples de couplages entre modèles monozones et multizones
VEB 6	Ventilation, énergie et confort Méthodes de mesure	<ul style="list-style-type: none"> - Introduction - Choix de la méthode de mesure appropriée - Moyens de mesure - Mesure de la température et de la vitesse de l'air pour le confort - Mesures pour juger un local - Mesures pour juger une installation de ventilation - Mesures dans des bâtiments à plusieurs zones - Bibliographie/index
VEB 7	Les systèmes de ventilation modernes Connaissances actuelles et marche à suivre pour la planification de bâtiments de services	<ul style="list-style-type: none"> - Confort thermique - Qualité de l'air ambiant - Ecoulement du flux d'air dans une pièce - Choix du système et domaine d'application - Ventilation par déplacement d'air (Quellüftung) - Ventilation par induction - Plafonds froids

Tableau 1.1:
Table des matières de la collection VEB [1.6].

1.4.3 Publications

Chaque chapitre principal contient à la fin une liste d'ouvrages se rapportant au thème traité. Les publications dont le titre est donné dans une autre langue que le français, n'existent que dans la langue indiquée.

Bibliographie chapitre 1

- [1.1] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
L'énergie électrique dans le bâtiment
Recommandation SIA 380/4, projet pour une phase d'essai de janvier à décembre 1992
- [1.2] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Performances techniques requises pour les installations de ventilation et de climatisation
Recommandation SIA V382/1, édition 1992
- [1.3] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Puissance de réfrigération à installer dans le bâtiment
Recommandation SIA V382/2, édition 1992
- [1.4] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Ergänzungen zur Berechnungsmethodik in der Empfehlung SIA V382/2
Dokumentation D 088, édition 1992
- [1.5] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Preuve des besoins pour les installations de ventilation et de climatisation
Recommandation SIA V382/3, édition 1992
- [1.6] Association suisse des entreprises de chauffage et de ventilation ASCV
Collection documentaire pour le programme de recherches « Ventilation et énergie dans le bâtiment »
 - VEB 1 Vue d'ensemble
 - VEB 2 Lexique de la ventilation
 - VEB 3 Aéraulique – Bases physiques
 - VEB 4 Atlas de la ventilation
 - VEB 5 Programmes de calcul des flux d'air dans les bâtiments
 - VEB 6 Ventilation énergie et confort – Méthodes de mesure
 - VEB 7 Les systèmes de ventilation modernes
- [1.7] Ch. Weinmann, Chr. Brunner
Etudes de cas
Documents pour le cours RAVEL « Installations de ventilation énergétiquement performantes »

2. Consommation d'électricité et potentiel d'économie

2.1	Consommation finale d'énergie en Suisse	19
2.2	La consommation d'électricité en fonction de son utilisation	19
2.3	Potentiel d'économie des installations de ventilation	19
	Bibliographie chapitre 2	20

2. Consommation d'électricité et potentiel d'économie

2.1 Consommation finale d'énergie en Suisse

La figure 2.1 présente la consommation finale d'énergie en fonction des vecteurs énergétiques, en Suisse, de 1910 à 1990.

La consommation finale d'énergie augmente de façon continue depuis le milieu de ce siècle. La seule petite diminution observée est due à la crise pétrolière du début des années septantes. L'électricité fait partie des vecteurs énergétiques dont la croissance est ininterrompue. La croissance annuelle a été de presque 3% en moyenne pendant les années huitantes. Pour les années nonantes, on s'attend encore à une augmentation, si possible atténuée, de la consommation d'électricité. Une stabilisation ne semble possible qu'au tournant du siècle.

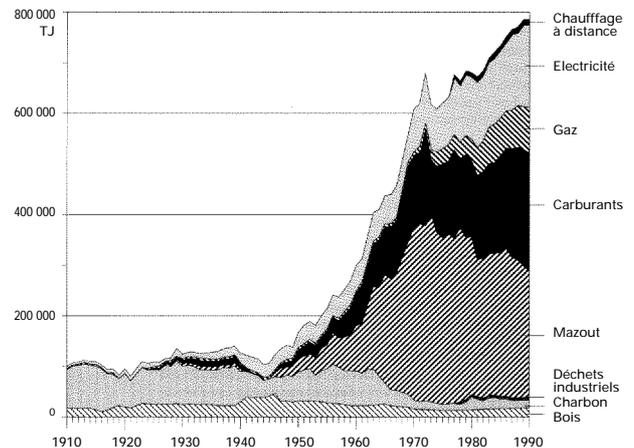


Figure 2.1 :
Energie finale consommée de 1910 à 1990 selon les vecteurs énergétiques [2.1].

2.2 La consommation d'électricité en fonction de son utilisation

La figure 2.2 représente, à partir d'une estimation grossière, la répartition de la consommation d'électricité en Suisse. On y voit que les installations techniques du bâtiment sont à l'origine d'un quart de la consommation totale d'électricité en Suisse, c'est-à-dire tout juste 12 500 sur un total de 50 000 GWh/a.

L'énergie électrique utilisée pour les moteurs de pompes et de ventilateurs, organes de commandes et ascenseurs, est estimée à 8% du total de la consommation, soit 4000 GWh/a.

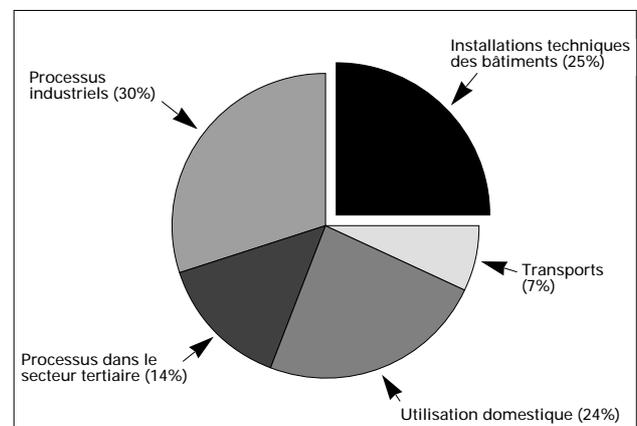


Figure 2.2 :
Matrice de consommation de l'électricité en Suisse [2.2].

2.3 Potentiel d'économie des installations de ventilation

Les installations de ventilation sont, sans aucun doute, susceptibles de dégager un fort potentiel d'économie d'électricité. Des mesures de consommation électrique effectuées sur des installations d'usage similaire montrent que les valeurs spécifiques de consommation d'électricité varient dans un rapport 1:5 pour le transport de l'air seul, et

dans un rapport 1 :8 pour la consommation globale d'électricité [2.3].

Les principales mesures pour réduire la consommation d'électricité des installations de ventilation sont les suivantes :

- Créer les conditions cadres nécessaires au niveau de la construction du bâtiment, de l'exploitation et de l'organisation pour obtenir des installations à faible consommation d'énergie.
- Tester systématiquement la nécessité des installations prévues.
- Fixer les critères de dimensionnement en fonction des besoins. Renoncer aux fonctions non nécessaires ainsi qu'aux installations et appareils surdimensionnés.
- Utiliser des composants ayant un bon rendement sur toute la plage de travail.
- Concevoir les installations en tenant compte des problèmes qui pourraient se poser à l'entretien et exploiter les installations selon les conditions fixées. Bien des économies sont déjà possibles avec une simple horloge.
- Rendre possible la mesure des paramètres déterminants de l'installation et sa consommation d'énergie. Pendant l'exploitation, procéder régulièrement aux mesures de contrôle. Faire une comptabilité énergétique.

Bibliographie chapitre 2

- [2.1] Office fédéral des questions conjoncturelles
Manuel RAVEL
L'électricité à bon escient
ISBN 3-905233-12-6, 1993
- [2.2] Office fédéral des questions conjoncturelles
Programme d'impulsions RAVEL
Concept 89
- [2.3] Ch. Weinmann, Chr. Brunner
Etudes de cas
Documents pour le cours RAVEL « Installations de ventilation énergétiquement performantes »

3. Données de base

3.1	Confort	23
3.1.1	Généralités	23
3.1.2	Zone de séjour	23
3.1.3	Confort thermique	24
3.1.4	Qualité de l'air des locaux	28
3.1.5	Exigences concernant l'acoustique	32
<hr/>		
3.2	Calcul des charges frigorifiques	33
3.2.1	Généralités	33
3.2.2	Déroulement du calcul	36
3.2.3	Débit d'air nécessaire pour évacuer la chaleur	37
<hr/>		
3.3	Détermination du débit d'air	38
<hr/>		
3.4	Besoins en énergie pour le transport de l'air	40
3.4.1	Exigences selon SIA V382/3	40
3.4.2	Puissance spécifique	40
3.4.3	Consommation spécifique d'énergie	42
3.4.4	Mesures pour réduire les pertes de charges	43
<hr/>		
3.5	SIA 380/4 « L'énergie électrique dans le bâtiment »	46
3.5.1	Buts	46
3.5.2	Avancement du projet de recommandation	46
3.5.3	Idées de base	46
3.5.4	Budget énergétique pour la lumière, le travail mécanique et le fonctionnement des équipements de production	47
3.5.5	Performance globale requise	48
<hr/>		
	Bibliographie chapitre 3	50

3. Données de base

3.1 Confort

3.1.1 Généralités

Les installations de ventilation et de climatisation ont une influence déterminante sur :

- le confort thermique ;
- la qualité de l'air ;
- le niveau d'intensité sonore.

D'autre part, le bien-être d'une personne dans un local et son efficacité au travail sont fonction de divers facteurs, tels que :

- le type d'activité et l'aménagement des places de travail ;
- la grandeur du local et l'ameublement ;
- l'éclairage et les couleurs ;
- la vue sur l'extérieur ;
- l'ambiance de travail ;
- le bien-être.

Basés sur les connaissances actuelles en matière de confort, les chiffres 3.1.3 à 3.1.5 formulent les conditions à respecter dans la zone de séjour qui est définie sous chiffre 3.1.2. Ces données sont tirées de la recommandation SIA V382/1 [3.8].

Même en satisfaisant aux exigences mentionnées ci-après, on a remarqué que des situations d'inconfort peuvent se produire en raison d'une mauvaise conception ergonomique des places de travail (par exemple une posture figée). Il est recommandé dans ce cas de réorganiser les places et les conditions de travail. Des demandes pour des exigences accrues de confort ne devraient être accordées qu'exceptionnellement.

Les exigences quant au confort thermique sont déterminées sous chiffre 3.1.3, par analogie à SIA V382/1, pour un indice PPD de 10%, moyennant quelques simplifications. Pour plus de détails, se reporter à ISO 7730 [3.2].

3.1.2 Zone de séjour

Les modalités sur le confort prescrites par la suite, ne s'appliquent pas à la totalité de la pièce, mais seulement à la zone de séjour. Par conséquent, on procédera aux mensurations de réception dans la zone de séjour.

Résumé

- Les modalités du confort et la définition de la zone de séjour doivent être fixées à temps et de façon exhaustive avec le maître de l'ouvrage. En général on partira des conditions arrêtées dans SIA V382/1.
- Des exigences accrues signifient dans la plupart des cas une augmentation de la consommation d'énergie. Il ne faut donc les satisfaire qu'exceptionnellement, où cela se justifie.

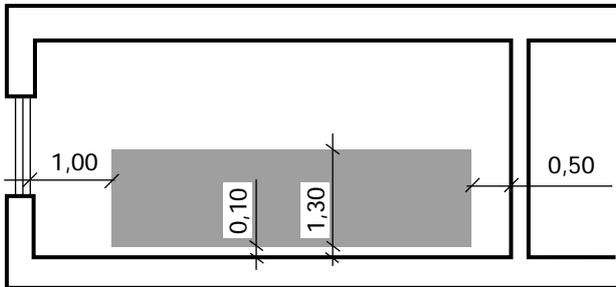


Figure 3.1 :
Zone de séjour [3.8].

La définition de la zone de séjour dépend de l'utilisation des locaux. Il est donc parfois nécessaire de la préciser.

De manière générale, elle peut être définie de la façon suivante (voir figure 3.1) :

- à 1,00 m de distance des fenêtres ;
- à 0,50 m de distance des parois internes et des parois externes non vitrées ;
- à 0,10 m de distance du plancher (limite inférieure) ;
- à 1,30 m de distance du plancher pour une activité assise ;
- à 1,80 m de distance du plancher pour une activité debout.

En l'absence d'arrangement particulier, les espaces suivants ne font pas partie de la zone de séjour :

- les zones de passage ;
- les endroits à proximité des portes ouvertes ou utilisées fréquemment ;
- les environs des bouches d'aération (par exemple des diffuseurs de sol) ;
- la proximité des appareils dégageant beaucoup de chaleur ou provoquant une forte convection (par exemple photocopieur ou ordinateur).

3.1.3 Confort thermique

La notion de confort thermique dans un local est fonction

- a) du local lui-même :
 - par la température moyenne des surfaces (température de rayonnement) ;
 - par les sources rayonnant de la chaleur.
- b) des occupants :
 - selon leurs activités, c'est-à-dire de leur dégagement de chaleur ;
 - en fonction de leur habillement, c'est-à-dire de leur isolation thermique.
- c) des prestations des installations de ventilation et de climatisation :
 - par la température de l'air ambiant ;
 - par le brassage de l'air (vitesse, direction, turbulences) ;
 - par l'humidité relative de l'air ambiant.

Les principes fondamentaux du confort thermique sont exposés dans la norme SIA 180 « Isolation thermique des bâtiments » [3.4].

Les définitions ci-dessous, extraites de la recommandation SIA V382/1, s'appliquent en complément aux locaux équipés d'une installation de ventilation.

Dans les bureaux, les calculs sont effectués sur la base d'un coefficient d'activité de 1,2 met et d'un coefficient d'habillement de 1,0 clo en hiver ou de 0,5 clo en été.

L'exploitation hivernale comprend tous les états de fonctionnement avec production de chaleur pour la ventilation ou le chauffage statique, pour autant que ce dernier ne serve pas essentiellement à améliorer le confort à proximité des vitrages. Le transport de chaleur provenant de surplus d'énergie ou d'installations de récupération de chaleur n'est pas considéré comme exploitation hivernale.

L'exploitation estivale comprend tous les états de fonctionnement d'une installation de ventilation, avec et sans réfrigération, à l'exclusion de la distribution de chaleur. Lorsque les charges thermiques intérieures sont importantes, il est même possible d'avoir une exploitation estivale en hiver.

3.1.3.1 Température de l'air ambiant t_i et température du local t_R (résultante)

Le rayonnement de chaleur émis par le corps humain dépend de la température des surfaces environnantes, alors que la chaleur émise par convection dépend de la température et de la vitesse de l'air.

La température résultante du local t_R , selon SIA 180 (dénommée *operative temperature* selon ISO 7730), est la grandeur caractéristique permettant de juger des conditions de confort pour le rayonnement du corps humain. La température résultante t_R diffère de la température de l'air ambiant t_i . Leur différence varie dans l'espace et dans le temps.

La température de l'air ambiant t_i est considérée comme premier critère de confort étant donné que le dimensionnement et le réglage des installations de ventilation s'effectue sur la base de t_i . C'est la température contrôlée lors de la réception, tout comme doivent l'être, en complément, la température du local t_R et la température

Exploitation hivernale clo = 1,0	Exploitation estivale clo = 0,5
Température planifiée = 20°C	Température planifiée = 26°C
Température en exploitation = 19-24°C	Température en exploitation = 22-28°C *

* Pendant la canicule ($t_e \text{ max} > 30^\circ\text{C}$), la température ambiante peut dépasser 28°C. Dans cette situation exceptionnelle, la température intérieure ne peut être garantie.

Tableau 3.1:
Température de l'air ambiant t_i planifiée et en exploitation, dans un bureau (1,2 met) [3.8].

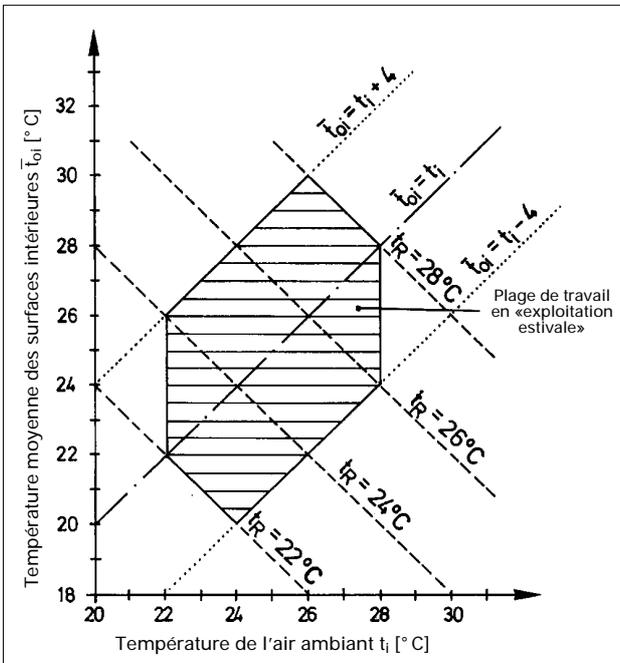


Figure 3.2:
Plages admissibles de la température moyenne des surfaces \bar{T}_{oi} en exploitation estivale, en fonction de la température de l'air t_i [3.8].

moyenne de surface \bar{T}_{oi} , afin de satisfaire le confort par rayonnement.

Température de l'air ambiant t_i pour la planification

Dans une construction bien isolée, équipée de protections solaires adéquates, les valeurs de planification de la température de l'air ambiant t_i sont définies au tableau 3.1 pour une activité normale de bureau (valeur met = 1,2) et un habillement adapté, pour l'hiver (valeur clo = 1,0) et l'été (valeur clo = 0,5). Ces valeurs tiennent compte de la sensibilité à la chaleur de tout le corps.

Dans le cas d'applications particulières avec d'autres valeurs clo et met, les valeurs de planification à prendre en compte pour la température de l'air ambiant peuvent être déterminées d'après ISO 7730, par analogie au tableau 3.1.

Les modalités de dimensionnement décrites dans la recommandation SIA V 382/2 doivent se baser sur les températures planifiées.

Contrôle du confort par rayonnement

En hiver, des retombées d'air froid à proximité des fenêtres peuvent se faire sentir. Il est nécessaire de respecter les exigences de la recommandation SIA 384/2 [3.12].

Afin de garantir le confort thermique souhaité en été, il faut que la différence entre la température moyenne des surfaces intérieures et celle de l'air ambiant soit inférieure à 4 K et que la température résultante t_R du local soit comprise entre 22 et 28°C. De plus, la vitesse d'air dans le local ne devrait pas dépasser les valeurs limites indiquées sous 3.1.3.2. Dans ces conditions, la température du local résulte de la moyenne entre la température de l'air et la température moyenne des surfaces intérieures (voir aussi norme SIA 180 [3.4]).

$$t_R = \frac{t_i + \bar{T}_{oi}}{2}$$

t_R Température résultante du local

t_i Température de l'air ambiant

\bar{T}_{oi} Température moyenne pondérée des surfaces intérieures

La figure 3.2 représente les plages admissibles de la température moyenne des surfaces \bar{T}_{oi} en

exploitation estivale, en fonction de la température de l'air ambiant t_i . La température du local t_R qui en résulte y est également mentionnée.

3.1.3.2 Vitesse de l'air dans le local

L'air diffusé dans un local crée des mouvements d'air turbulents dont les vitesses sont variables dans le temps. Le degré de turbulence Tu caractérise les turbulences du mouvement de l'air.

$$Tu = \frac{W_{84\%} - W_{50\%}}{W_{50\%}}$$

- Tu = Degré de turbulence [-]
- $W_{84\%}$ = Vitesse limite de l'air non dépassée pendant les 84 % du temps de mesure
- $W_{50\%}$ = Vitesse limite de l'air non dépassée pendant les 50 % du temps de mesure

Avec des faibles turbulences (par exemple salles blanches) les vitesses de l'air peuvent être plus élevées. Avec de fortes turbulences, les vitesses admises sont moindres.

De façon générale, les vitesses d'air admissibles sont plus élevées pour des températures ambiantes élevées que pour des températures ambiantes basses. La figure 3.3 montre ces relations, basées sur un modèle développé par le CEN/TC 156/WG 6. Elles sont valables pour des personnes au comportement thermique globalement neutre.

Dans des locaux ventilés de façon conventionnelle, le degré de turbulence se situe entre 0,3 et 0,6. Dans ces conditions on applique les valeurs limites du tableau 3.2.

Les vitesses de l'air susmentionnées correspondent à des exigences sévères ne pouvant être respectées qu'au moyen d'investissements appropriés.

Ces conditions sont nécessaires pour garantir le confort avec les températures d'air ambiant du tableau 3.1.

Une pré-étude du système de ventilation en laboratoire est recommandée pour les locaux critiques (par exemple un local avec de grandes surfaces vitrées ou de géométrie complexe).

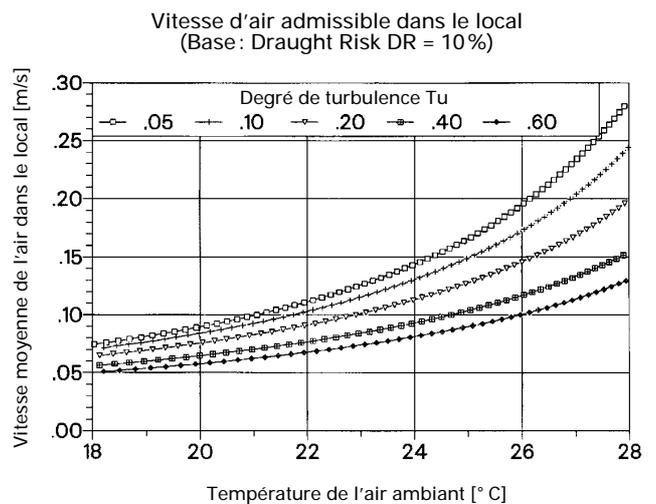


Figure 3.3: Vitesse de l'air admissible en fonction de la température ambiante et du degré de turbulence [3.8].

Exploitation hivernale $clo = 1,0$	Exploitation estivale $clo = 0,5$
$t_i = 19 - 24^\circ C$ 0,12 m/s	$t_i = 22 - 28^\circ C$ 0,15 m/s

Tableau 3.2: Valeurs admissibles de la vitesse limite de l'air, non dépassée durant 50 % du temps et pour une activité de bureau (1,2 met) [3.8].

3.1.3.3 Humidité de l'air du local

Entre 19 et 28° C, la part d'évaporation nécessaire au maintien et à la régulation de la température du corps humain est faible. C'est pourquoi l'humidité relative de la zone de confort se situe entre $\phi_i = 30\%$ h.r. (en hiver avec $t_i = 19-24^\circ\text{C}$) et 65% h.r. (en été avec $t_i = 22-28^\circ\text{C}$). Des valeurs inférieures jusqu'à 20% h.r. ou supérieures jusqu'à 75% h.r., peuvent, du point de vue physiologique, être tolérées occasionnellement pendant quelques jours par an.

L'humidification de l'air n'est en général pas nécessaire s'il n'y a pas d'exigences particulières relatives à l'ambiance du local (voir recommandation SIA V 382/3 [3.11]). Pratiquement, on constate que les plaintes dues à un air trop sec sont souvent causées, soit par des températures trop élevées, soit par trop d'air frais, soit par une teneur en poussière trop élevée de l'air ou encore par la présence d'autres impuretés, par exemple la formaldéhyde. On effectuera la purification de l'air à la source, au moyen de techniques appropriées.

Pour autant qu'une humidification soit exigée, l'emploi d'un humidificateur local se révèle souvent plus efficace qu'une humidification générale insérée dans l'installation de ventilation et de climatisation.

Le refroidissement de l'air peut entraîner un effet de déshumidification. Une déshumidification ou une humidification complémentaire ne se justifie que pour les locaux à exigences particulières.

3.1.4 Qualité de l'air des locaux

L'air du local doit être traité de manière à éviter :

- tout problème de santé ;
- tout préjudice au bien-être ;
- tout dommage causé aux locaux.

Parallèlement, les besoins énergétiques des installations de ventilation et de climatisation doivent être réduits au minimum.

La seconde exigence consiste en une réduction des émissions nocives à la source, afin qu'elles soient suffisamment réduites pour que l'apport d'air neuf suffise à les diluer. Ceci est en particulier valable

concernant les émissions des équipements intérieurs, matériaux de construction et travaux de nettoyage, ainsi que contre les infiltrations de radon dans les locaux habités. Si des sources ponctuelles d'émissions nocives persistent, il convient d'aménager une protection ou une bouche d'aspiration au bon endroit, de manière à ce qu'elles ne soient plus décelables dans le reste du local.

Les clauses suivantes relatives à la qualité de l'air ambiant s'appliquent à la zone de séjour selon 3.1.2.

Le taux de renouvellement d'air des locaux non fumeurs est déterminé par les odeurs corporelles transmises à l'air ambiant et, selon les régions et la température extérieure, par le taux d'humidité. La teneur en dioxyde de carbone est un bon indicateur du niveau des émanations corporelles.

On peut aussi utiliser le Dezipol pour l'appréciation ressentie de la qualité de l'air et l'Olf comme unité de base pour le taux de pollution de l'air. Les valeurs Dezipol et l'acceptation de la qualité de l'air sont liées, comme le sont le taux de renouvellement d'air et son acceptation. Ainsi, on peut adjoindre à chaque valeur Dezipol, la quantité d'air extérieur à apporter pour obtenir la qualité d'air requise. Il faut savoir, que seules les pollutions ressenties sont prises en considération lors de l'appréciation de la qualité de l'air à l'aide de Dezipol; le cumul de pollutions de nature différente peut être problématique.

Les locaux où l'on fume nécessitent un plus grand renouvellement d'air. L'utilisation de critères pour la fumée de tabac, comme par exemple le monoxyde de carbone, est discutable.

En effet, les détecteurs dédiés à cet usage ne permettent que de déterminer une concentration moyenne dans la pièce, et non pas la concentration dans l'environnement immédiat des fumeurs, laquelle est déterminante pour l'incommodation due à la fumée.

Pour les émissions inévitables comme le CO₂, les odeurs, l'humidité et éventuellement la fumée de tabac, il convient de se conformer au taux de renouvellement d'air figurant sous 3.1.4.1 ainsi que sous 3.1.4.2. Un bon système de remplacement de l'air, permet d'obtenir la qualité de l'air requise, tout en opérant avec un faible taux de renouvellement.

3.1.4.1 Taux de renouvellement d'air conseillé

Le taux de renouvellement d'air dans les locaux non fumeurs est fonction des exigences de confort désiré. De façon générale, l'installation de ventilation sera dimensionnée pour une teneur en dioxyde de carbone de 0,10 %, (correspondant à une différence de 0,06-0,07 % entre l'air intérieur et extérieur) ce qui correspond à un taux de renouvellement d'air de 25 à 30 m³ par heure et par personne. Du seul point de vue hygiénique, une teneur en dioxyde de carbone de 0,15 % (correspondant ainsi à une différence de 0,11%-0,12%) est encore tout à fait acceptable ; 12 à 15 m³ par heure et par personne sont alors nécessaires.

Des enquêtes ont rapporté qu'avec une teneur de 0,15% en dioxyde de carbone dans un local, la qualité de l'air était considérée comme suffisante par 85 % des occupants.

Pour une même arrivée d'air, plus le volume d'un local est grand, plus la teneur en dioxyde de carbone augmente lentement, jusqu'à une stabilisation de la concentration. Les débits d'air recommandés pour respecter les concentrations en dioxyde de carbone de 0,10 %, respectivement 0,15 %, ont été établis sur la base d'une installation d'aération conventionnelle. Une optimisation de l'insufflation et de la diffusion de l'air permettrait de diminuer l'apport d'air extérieur.

Dans les locaux fumeurs, 30 à 40m³ par heure et par personne sont nécessaires pour éviter des irritations aiguës et environ 60 à 70m³ par heure et par personne pour éviter tout désagrément. Dans les grands locaux publics ou dans les grands bureaux pourvus d'installations de ventilation, il convient d'ajuster l'apport d'air extérieur en fonction du nombre de cigarettes fumées à l'heure. Pour éviter tout désagrément ou toute atteinte à la santé, une interdiction de fumer s'impose. Il est fortement conseillé d'aménager des fumoirs ou des bureaux pour fumeurs, là où cela est possible.

Dans les locaux de petite taille (jusqu'à environ 100m³), il est possible d'installer des purificateurs d'air afin de réduire les nuisances dues au tabac. Cela nécessite toutefois des filtres performants, un entretien régulier et un taux de brassage d'au moins deux à trois fois par heure.

Si les principes de diminution des émissions ne sont pas suffisamment respectés, l'air du local

risque d'être pollué pendant les 2 à 3 premières années d'exploitation par des substances organiques gênantes, voire même nocives, exigeant alors une intensification de l'aération.

En respectant les taux de renouvellement d'air cités précédemment, les dégâts dus à l'humidité et l'apparition de moisissures peuvent être évités dans les habitations et les bureaux conformes à la norme SIA 180.

Le tableau 3.3 résume les taux de renouvellement d'air recommandés.

Dans les locaux peu ou pas occupés, on recommande, pour des raisons d'hygiène, un taux de renouvellement d'air d'au moins $0,3 \text{ h}^{-1}$ ou une aération suffisante du local avant chaque occupation.

3.1.4.2 Qualité de l'air extérieur

L'air pulsé dans les habitations et dans les bureaux devrait répondre aux exigences de l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair). Le critère guide permettant d'apprécier la qualité de l'air extérieur est la teneur en dioxyde d'azote NO_2 . L'annexe 7 de l'OPair fixe les valeurs limites d'immission suivantes pour le NO_2 .

Les valeurs limites selon OPair sont valables pour la nuisance globale qu'on peut mesurer, provenant de diverses sources et en prenant en considération les nuisances pré-existantes. Les services cantonaux sont généralement en mesure de renseigner sur les immissions du site concerné.

Le taux de NO_2 dans les locaux ventilés naturellement, ou équipés d'une ventilation mécanique sans filtres spéciaux, atteignent à peu près la moitié de la concentration contenue dans l'air extérieur, pour autant qu'il n'y ait pas de sources d'émissions d'oxyde d'azote importantes. Des nuisances de l'air extérieur avec un concentration du double des valeurs limites OPair n'existent pratiquement plus aujourd'hui en Suisse. Une installation de ventilation créée uniquement à cause d'une teneur élevée de l'air extérieur en polluants, n'a donc plus de raison d'être, à moins qu'il ne s'agisse d'une situation exceptionnelle, par exemple la présence anormale d'odeurs et de poussières.

Fumée	Taux de renouvellement d'air extérieur recommandé par personne
interdit	pour 0,15 % CO_2 : $v = 12-15 \text{ m}^3/\text{h}$ et personne pour 0,10 % CO_2 : $v = 25-30 \text{ m}^3/\text{h}$ et personne*
autorisé	$v = 30-70 \text{ m}^3/\text{h}$ et personne

* Base générale pour locaux non fumeurs.

Tableau 3.3:
Renouvellement d'air recommandé par personne [3.8].

Valeur limite d'immission	Définition statistique
$30 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$	moyenne annuelle (moyenne arithmétique)
$100 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$	95% des moyennes semi-horaires d'une année $\leq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
$80 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$	moyenne par 24h; ne doit en aucun cas être dépassé plus d'une fois par année

Tableau 3.4:
Valeurs limites d'immission selon OPAIR pour le NO_2 [3.13].

3.1.5 Exigences concernant l'acoustique

La norme SIA 181 [3.5] fixe les exigences concernant la protection contre le bruit dans les bâtiments (y compris installations techniques des immeubles) ayant des locaux sensibles au bruit, en provenance de l'extérieur ou de l'intérieur. Les locaux d'habitation et les bureaux sont en général considérés comme ayant une sensibilité au bruit de classe moyenne. En l'absence de convention spéciale on appliquera les exigences minimales de la norme SIA 181 [3.5].

L'ordonnance fédérale sur la protection contre le bruit OPB a pour but de protéger, contre le bruit nuisible ou incommode, les zones extérieures ainsi que les locaux dont les fenêtres sont ouvertes. Les émissions de bruit extérieur sont trop fortes, lorsque les valeurs limites d'immission selon OPB pour le degré de sensibilité considéré sont dépassées. Dans ce cas, une installation de ventilation peut se justifier, afin de garantir l'apport d'air frais fenêtres fermées. On bénéficie aujourd'hui, pour la plupart des zones, de cadastres de bruit dont on peut tirer des valeurs utiles.

3.2 Calcul des charges frigorifiques

3.2.1 Généralités

Le calcul de la charge frigorifique d'un local ou d'un bâtiment est un travail déjà passablement complexe pour lequel il existe aujourd'hui différents modèles de simulation dynamique. Il en va de même lorsqu'il faut évaluer la température intérieure à laquelle il faut s'attendre en été, sans climatisation.

A l'EMPA, deux programmes se sont entre autres révélés pratiques pour réaliser ce genre de calcul, il s'agit de DOE-2 et HELIOS.

Programme informatique HELIOS

Il a été développé par le département de physique du bâtiment de l'EMPA et est aujourd'hui proposé en version PC. Il s'agit d'un modèle de simulation dynamique à une zone, permettant de saisir le comportement thermique d'immeubles, par pas d'une heure. Il tient compte du comportement du rayonnement à longue et courte longueur d'onde. Le modèle de calcul utilise la méthode du bilan énergétique; les phénomènes d'accumulation non stationnaires sont résolus à l'aide de la méthode des facteurs de réponse.

Le programme ne tient pas compte, entre autres, du comportement en humidité du bâtiment, des ponts thermiques, des calculs de lumière du jour, des calculs d'ombre, de l'influence des divers systèmes de climatisation.

Le programme HELIOS est relativement facile à maîtriser, en particulier pour l'utilisateur peu entraîné. Il est bien adapté pour le calcul des charges frigorifiques et thermiques de zones individuelles ainsi que pour évaluer les équipements de protection thermique d'été, respectivement pour établir la preuve du besoin pour une installation de climatisation.

Programme informatique DOE-2

Il s'agit d'un logiciel de simulation pour la technique du bâtiment, qui décrit le comportement thermique du bâtiment au cours du temps, par

Résumé

- Avant de procéder au calcul des charges frigorifiques, il faut prouver qu'une installation de froid se justifie. La procédure à suivre est décrite dans SIA V382/3 et dans les règlements officiels.
- La méthode de calcul est décrite dans SIA V382/2. On peut effectuer le calcul à la main ou à l'aide d'un programme informatique.
- Des mesures adéquates touchant la construction permettent également de minimiser la charge frigorifique. Il s'agit en particulier d'avoir une protection solaire extérieure efficace et une forte capacité d'accumulation thermique de la construction.
- On calcule les composants individuels de la charge frigorifique heure par heure. Tenir en particulier compte du déroulement journalier effectif des charges internes auxquelles on peut s'attendre.
- La charge frigorifique totale d'un bâtiment ne correspond pas à la somme des charges maximales par local, mais à la somme des profils individuels.

pas d'une heure. Il a été développé par le Simulation Research Group du Lawrence Berkeley Laboratory à Berkeley, CA, USA, en collaboration avec d'autres instituts et avec l'aide de contributions financières du US Department of Energy.

La première version du programme date de 1978 (DOE-1). Le programme a été continuellement amélioré et développé depuis. En particulier, diverses sociétés américaines de distribution d'énergie soutiennent le développement d'extensions du programme, afin de pouvoir faire face à de nouvelles exigences. La présente version DOE-2.1 D actuellement en usage existe depuis 1989.

Le programme, originalement développé sous le système d'exploitation UNIX, est maintenant proposé depuis plusieurs années pour PC, grâce à au moins un fournisseur privé indépendant. Pour PC, seule la version « DX » compilée avec « Extended DOS » est en mesure d'utiliser toutes les fonctionnalités du programme.

Le programme est aujourd'hui très largement utilisé aux USA, mais est aussi assez répandu dans le reste du monde. Le programme est utilisé en Suisse depuis de nombreuses années par l'EMPA, dans le cadre de projets de recherche et de mandats de calculs. Il est également utilisé depuis quelques années – surtout depuis la sortie de la version PC – par un nombre croissant (environ 30 début 1992) de bureaux d'ingénieurs et d'entreprises de conseil en énergie. Dès lors, l'EMPA se limite à supporter les utilisateurs externes en les conseillant en cas de problèmes, met à disposition des données météo Suisse, s'occupe de nouvelles versions du programme et de documentation, ainsi que des améliorations nécessaires du programme.

Le programme DOE-2, du fait de ces multiples possibilités, exige un assez long apprentissage et un travail de préparation des données et d'analyse de plausibilité des résultats, qu'il ne faut pas sous-estimer. La version DOE-PLUS ayant une interface à menus devrait apporter une certaine simplification. De plus, l'EMPA met à disposition des fichiers de données standards pour les cas typiques.

Recommandation SIA V382/2

En Suisse, on effectue le calcul des charge frigorifiques de locaux individuels et de bâtiments

entiers à l'aide de la recommandation SIA V382/2 « Puissance de réfrigération à installer dans le bâtiment » [3.9]. Elle décrit une méthode de calcul manuelle utilisant des différences de températures virtuelles et des facteurs de capacité d'accumulation, déterminés par l'EMPA pour des cas typiques, à l'aide du programme DOE-2. Elle décrit en parallèle, les conditions limites à utiliser pour le calcul de la charge frigorifique à l'aide du programme DOE-2 ou d'autres programmes de simulation. La documentation SIA D 088 « Ergänzungen zur Berechnungsmethodik in der Empfehlung SIA V382/2 » [3.10] (seulement en allemand) décrit de façon exhaustive les conditions limites et les calculs effectués.

Données météorologiques

Selon SIA V382/2, on effectue le calcul pour les mois de juillet (été) et septembre (automne). Il s'agit de données synthétiques avec les valeurs limites suivantes :

- Température extérieure

Déroulement journalier sinusoïdal

Juillet : Moyenne = 22,5° C
Maximum = 30,0° C

Septembre : Moyenne = 19,0° C
Maximum = 26,0° C

Le calcul est effectué en régime stationnaire (5^e jour).

- Rayonnement

Données pour jours clairs pour le 23 juillet (été) et le 23 septembre (automne). La recommandation SIA V382/2 contient ces données sous forme de tableau pour la station Zurich - Kloten. En complément on peut utiliser le programme SOLAR 1 (à commander auprès de la SIA) qui permet de calculer ces données pour n'importe quel endroit en Suisse et pour des surfaces d'orientation quelconque.

Si nécessaire, l'EMPA dispose encore d'autres sets de données climatiques.

3.2.2 Dérroulement du calcul

La puissance frigorifique d'un local se compose de :

- la chaleur produite dans le local même (charge interne) et
- la chaleur pénétrant depuis l'extérieur dans le local (charge externe).

A l'état stationnaire, à température ambiante constante, la chaleur dissipée dans le local est directement évacuée par la ventilation. Les charges internes et externes sont calculées avec le signe positif, lorsqu'elles augmentent la charge thermique du local.

La charge de refroidissement globale d'un bâtiment se compose d'un grand nombre de sources individuelles, qu'il faut soigneusement calculer. En particulier, on veillera à tenir compte de la fréquence et de la durée dans le temps des charges thermiques, ainsi que de la simultanéité entre les différents locaux.

Les sources de chaleur suivantes sont prises en considération :

Charges internes (section 6 dans SIA V382/2)

Chaleur dégagée par les personnes	P_P
Gains de chaleur dus à l'éclairage	P_L
Gains de chaleur des appareils	P_A
Transmission par les surfaces internes	P_{PI}
Gains provenant d'autres sources	P_{div}

Charges externes (section 7 dans SIA V382/2)

Transmission par parois extérieures opaques	$P_{PE, T}$
Transmission par les fenêtres	P_F
Rayonnement solaire à travers les fenêtres	P_{RF}

La puissance thermique sensible à évacuer du local, resp. de l'immeuble entier, par l'installation de ventilation, resp. de climatisation s'écrit :

$$P = (P_P + P_L + P_A + P_{PI} + P_{div}) + (P_{PE} + P_T + P_F + P_{RF})$$

3.2.3 Débit d'air nécessaire pour évacuer la chaleur

Le débit d'air nécessaire pour évacuer la puissance thermique P définie en 3.2.2 se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$\dot{V}_{AS} = \frac{P \cdot 3600}{\rho \cdot c \cdot (t_i - t_{AS})}$$

\dot{V}_{AS}	Débit d'air soufflé [m ³ /h]
P	Puissance thermique sensible [W]
ρ	Densité de l'air [kg/m ³]
c	Chaleur spécifique de l'air [J/Kg · K]
t_i	Température ambiante [° C]
t_{AS}	Température de l'air soufflé mesuré à la grille de pulsion [° C]

Pour simplifier, on peut utiliser les équations suivantes :

Pour le plateau Suisse

$$\dot{V}_{AS} = \frac{P}{0,32 \cdot (t_i - t_{AS})}$$

A 1000 m s. M.

$$\dot{V}_{AS} = \frac{P}{0,30 \cdot (t_i - t_{AS})}$$

Résumé

- Déterminer le débit d'air en fonction des débits nécessaires par personne.
- Réduire les sources de chaleur, de polluants et d'humidité, ou les aspirer à la source.
- Lorsque la charge frigorifique est élevée, utiliser l'eau comme caloporteur ou installer localement un appareil travaillant en air de roulement.

3.3 Détermination du débit d'air

Les divers critères suivants permettent de déterminer le débit d'air nécessaire :

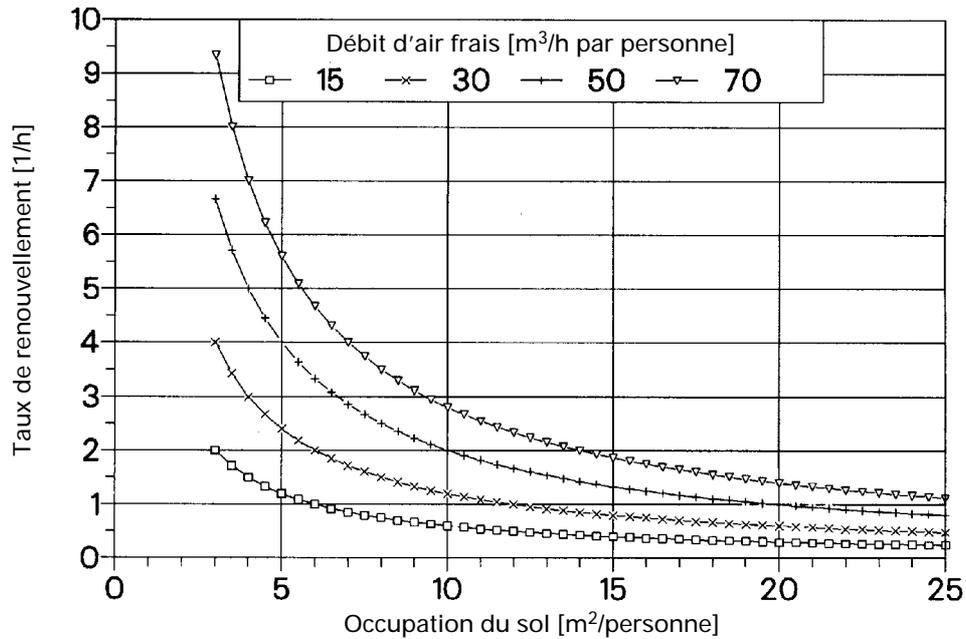
- Débits d'air nécessaires par personne (chiffre 3.1.4).
- Evacuation de la chaleur à l'aide de la ventilation (chiffre 3.2.3).
- Evacuation de polluants et d'humidité.
- Ecoulement de l'air dans le local.

D'un point de vue énergétique, il est souhaitable de déterminer le débit d'air frais en fonction du débit d'air nécessaire par personne et de renoncer à l'air de roulement, ce qui signifie : Air pulsé = Air frais. S'il n'est pas possible d'évacuer la charge thermique avec ce débit, il faut tester la possibilité d'installer un système complémentaire à eau ou un appareil recyclant l'air localement. Il ne devrait normalement pas être nécessaire, dans des locaux d'habitation ou des bureaux, d'augmenter ces débits pour évacuer des polluants, de l'humidité ou pour réaliser l'écoulement d'air désiré dans le local.

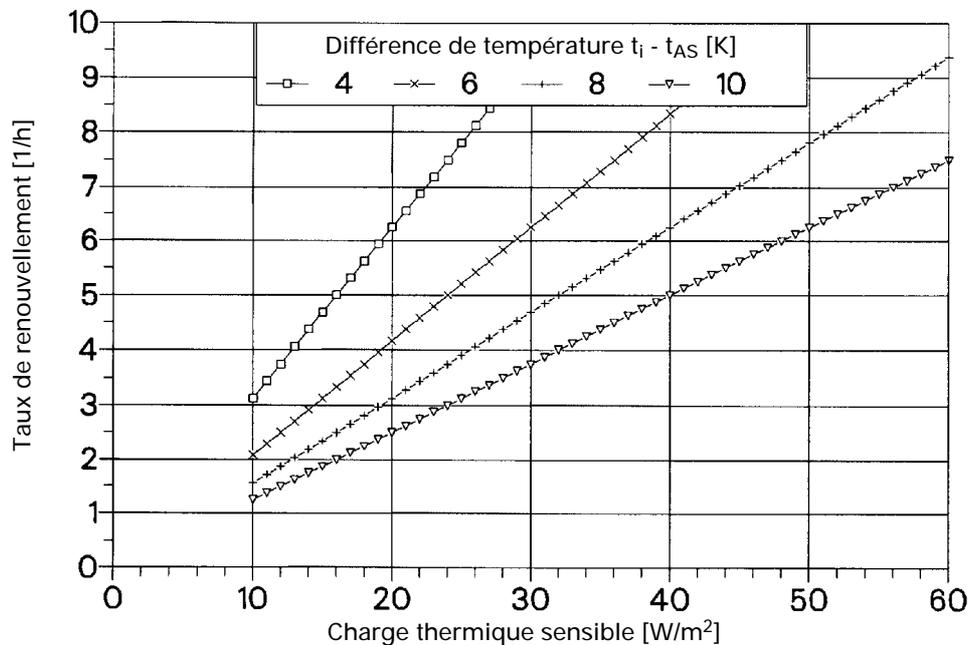
La figure 3.4 représente les débits d'air hygiéniques nécessaires, exprimés en renouvellements horaires pour un local de 2,5 m de hauteur.

Pour une occupation moyenne de bureau de 10 m² par personne, on obtient, par exemple pour un débit d'air frais de 50 m³/h par personne, un taux de renouvellement horaire de l'air frais de deux fois par heure. Avec une différence de température de 10 K entre l'air frais et l'air vicié, on peut donc évacuer une charge sensible constante de 16 W/m².

Taux de renouvellement pour l'amenée d'air frais



Taux de renouvellement pour l'évacuation de chaleur



D'un point de vue énergétique, il est souhaitable de déterminer le débit d'air frais en fonction du débit d'air nécessaire par personne et de renoncer à l'air de roulement. S'il n'est pas possible d'évacuer la charge thermique avec ce débit, il faut tester la possibilité d'installer un système complémentaire à circulation d'eau.

Figure 3.4 :
Taux de renouvellement d'air typiques (hauteur libre du local = 2,5 m).

Résumé

- Le transport de l'air est un des principaux consommateurs d'électricité des installations de ventilation.
- Les mesures suivantes permettent de réduire la consommation d'énergie :
 - Minimiser le nombre d'heures de fonctionnement.
 - Réduire les débits d'air au minimum effectivement nécessaire, donc entre autre éviter les émissions inutiles de chaleur, d'humidité et de polluants dans les locaux (voir chiffre 3.3).
 - Lorsque l'installation doit satisfaire à des conditions changeantes, piloter le débit d'air frais à l'aide par exemple de sondes de CO₂ ou de sondes détectant un mélange de gaz.
 - Minimiser les pertes de charge en travaillant à basse vitesse dans les canaux et les monoblocs, avec des réseaux courts et des pièces de forme de dimensions favorables.
 - Utiliser des ventilateurs et des moteurs ayant un rendement élevé sur la plage de travail la plus utilisée.
- La répartition effective de l'air dans les différents locaux doit correspondre aussi précisément que possible aux débits prévus. Ceci est particulièrement important pour les installations dont le débit d'air est calculé en fonction des besoins hygiéniques.
- Il est nécessaire d'effectuer un calcul de pertes de charges, aussi précis que possible, de manière à pouvoir se passer d'organes d'étranglement et pour pouvoir dimensionner les ventilateurs et les moteurs aussi précisément que possible.

3.4 Besoins en énergie pour le transport de l'air

3.4.1 Exigences selon SIA V382/3

La recommandation SIA V382/3 [3.11] définit les exigences de base et les exigences accrues, déterminantes pour réduire la puissance nécessaire au transport de l'air :

Exigences selon SIA V382/3		
Paramètres	de base (chiffre 5 4)	accrues (chiffre 5 2 6 2)
Perte de charge totale (pulsion + aspiration)	≤ 1200 Pa	≤ 900 Pa
Débit d'air frais/personne		
- fumeurs	≤70 m ³ /h-pers	≤50 m ³ /h-pers
- non fumeurs	≤30 m ³ /h-pers	≤25 m ³ /h-pers
Rendement global au point de fonctionnement optimal, en fonction du débit		
> 15 000 m ³ /h	> 65 %	> 70 %
10 000 m ³ /h	> 60 %	> 65 %
5000 m ³ /h	> 55 %	> 60 %

Tableau 3.5: Exigences permettant de réduire la puissance nécessaire pour transporter l'air [3.11].

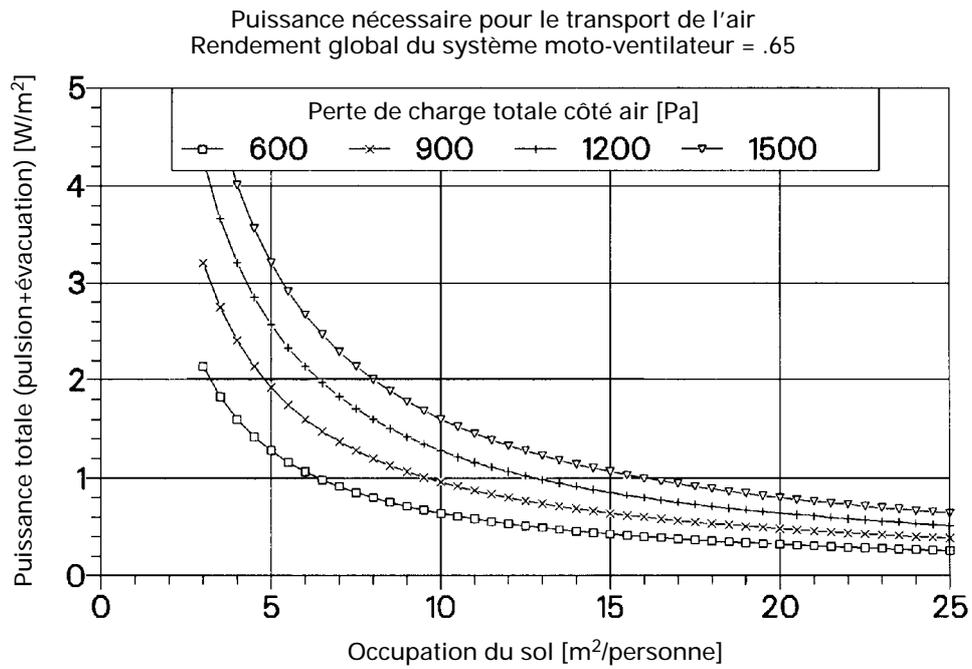
3.4.2 Puissance spécifique

La puissance spécifique pour le transport de l'air, rapportée à la surface au sol nette, s'exprime :

$$P_{RN} = \frac{v \cdot \Delta p}{\text{Occupation} \cdot \eta_{\text{tot}} \cdot 3600}$$

P_{RN}	Puissance pour le transport de l'air par m ² de surface au sol nette [W/m ²]
v	Débit d'air neuf par personne [m ³ /h et personne]
Δp	Perte de charge [Pa] (pulsion + aspiration)
Occupation	Nombre de m ² par personne [m ² nets/personne]
η_{tot}	Rendement total ventilateur, moteur, entraînement [-] (moyenne entre ventilateur de pulsion et aspiration)

Débit d'air frais = $25 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{personne}$



Débit d'air frais = $50 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{personne}$

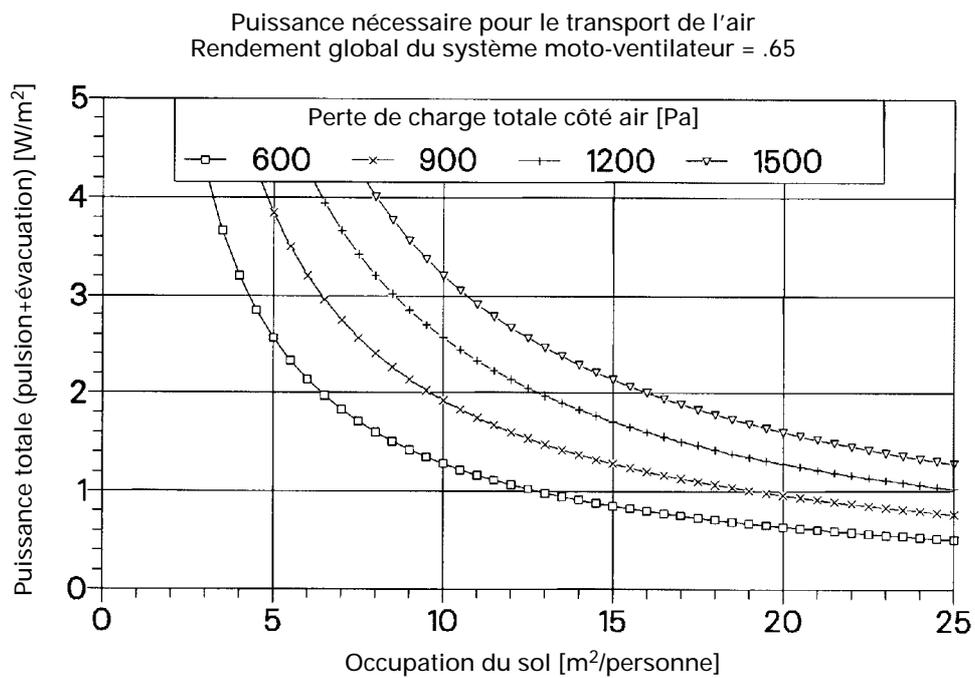


Figure 3.5:
Puissance nécessaire pour transporter l'air (Rendement global du système moto-ventilateur = 0,65).

La figure 3.5 représente la puissance nécessaire au transport de l'air, pour un débit de 50 m³/h par personne (graphique du bas, exigences accrues selon tableau 3.5, fumeurs) et pour un débit de 25 m³/h par personne (graphique du haut, exigences accrues, non-fumeurs).

3.4.3 Consommation spécifique d'énergie

La puissance nécessaire au transport de l'air a été décrite au chiffre 3.4.2. Si le régime reste constant pendant l'utilisation, on peut calculer de la façon suivante la consommation d'énergie annuelle due au transport de l'air. Cette valeur est rapportée, conformément aux définitions de la future recommandation SIA 380/4 (chiffre 3.5) à la surface de référence énergétique (surface brute).

$$E_{TA} = \frac{v \cdot \Delta p \cdot h_b}{\text{Occupation} \cdot \eta_{\text{tot}} \cdot (\text{SRE/SN}) \cdot 10^6}$$

E_{TA}	Consommation d'énergie pour le transport de l'air [MJ/m ² .a] (rapportée à la surface brute)
v	Débit d'air neuf par personne [m ³ /h et personne]
Δp	Perte de charge [Pa] (pulsion + aspiration, y.c. RC)
h_b	Temps d'utilisation annuel de l'installation [h/a]
Occupation	Nombre de m ² par personne [m ² nets/personne]
η_{tot}	Rendement total ventilateur, moteur, entraînement [-] (moyenne entre ventilateur de pulsion et aspiration)
SRE/SN	Rapport de la surface de référence énergétique (surface brute) à la surface nette [-] (typiquement = 1,1).

Dans certaines installations, on peut by-passer la récupération de chaleur en été, ce qui réduit la perte de charge. Ceci n'est utile que dans la mesure où on peut maintenir le débit constant en réduisant la vitesse de rotation du ventilateur.

En analysant la formule susmentionnée, on constate que la consommation d'énergie pour le transport de l'air peut être réduite en appliquant les mesures suivantes :

- Minimiser le nombre d'heures de fonctionnement.
- Réduire le débit d'air au minimum effectivement nécessaire.
- Minimiser les pertes de charges.
- Utiliser des ventilateurs et des moteurs ayant un rendement élevé sur toute la plage de travail.

3.4.4 Mesures pour réduire les pertes de charges

La recommandation SIA V382/3 spécifie que la perte de charge totale (pulsion + aspiration) ne devrait plus dépasser 1200 Pa. Cette limite est abaissée à 900 Pa pour les installations énergétiquement très performantes (chiffre 3.4.1). Pour y parvenir, il est nécessaire de tenir compte des directives suivantes.

3.4.4.1 Position des centrales

Pour éviter des pertes de charges inutiles, il faut veiller à ce que les trajets entre centrales et prise d'air frais/air évacué, ainsi qu'entre centrales et locaux restent aussi courts que possible.

La prise d'air frais doit être proche de la centrale et placée de manière à aspirer de l'air peu chargé en polluants. Prendre garde aux points suivants :

- Ne pas aspirer du côté de rues à fort trafic.
- Veiller à éviter les effets de by-pass entre prise d'air neuf et éjection de l'air vicié ou autres polluants.
- Ne pas aspirer directement au niveau du sol, respecter une distance d'au moins un mètre.
- Prévoir un accès pour le nettoyage.

Dans le cas de grandes installations, il peut paraître judicieux de subdiviser les installations et les gaines techniques. Prendre également garde aux problèmes de cloisonnement coupe-feu. Plus la subdivision est poussée, plus la protection feu et les modifications ultérieures du réseau deviennent faciles.

3.4.4.2 Filtration

Une filtration de classe EU 5/6 est le plus souvent suffisante pour des installations desservant des immeubles administratifs. Les préfiltres (par

exemple filtres grossiers EU 3) augmentent la perte de charge et n'apportent en général pas d'augmentation de la durée de vie des filtres situés en aval. Les filtres devraient de toute façon être changés au plus tard après une année ou une année et demie, pour exclure tous problèmes d'odeurs.

L'efficacité de la filtration est fortement conditionnée par l'étanchéité du montage. Il en va de même pour les monoblocs et les réseaux de gaines. La classe de filtration peut même baisser de deux crans s'il y a by-pass d'air autour des filtres ou trop de fuites.

Pour déterminer la résistance du filtre lors du dimensionnement de l'installation, il faut partir d'une résistance finale plus faible que celle indiquée normalement par le fabricant. A recommander, pour un filtre EU 5/6 de résistance initiale 70 Pa, une résistance finale de 150 Pa, respectivement une résistance de 100 Pa pour le dimensionnement.

3.4.4.3 Appareil de traitement d'air

Lors du choix de l'appareil de traitement de l'air, il faut veiller à éviter tout dispositif qui augmente la vitesse localement, augmente les pertes de charge par des resserrements inutiles et irrite mal le ventilateur.

Des recherches sur les frais d'exploitation annuels totaux d'appareils de traitement d'air en fonction de la vitesse, ont montré qu'ils étaient minimum pour des vitesses comprises entre 2 et 4 m/s (voir exemple figure 3.6). C'est pourquoi, du point de vue énergétique, on recommande aujourd'hui généralement pour les installations de ventilation des bâtiments administratifs, une vitesse de 2 m/s dans les appareils de traitement d'air (sur la section nette du monobloc). Dans le canton de Zurich, cette vitesse est prescrite [3.3]. Dans certains cas particuliers, par exemple temps de fonctionnement particulièrement long ou court, la vitesse de l'air optimale peut s'éloigner de cette valeur-cible, pour autant qu'on puisse le prouver.

Pour autant qu'ils soient nécessaires, les amortisseurs de bruit montés à l'aspiration devraient être placés dans les appareils de traitement d'air, car la vitesse de l'air y est plus faible et donc les pertes de charge réduites.

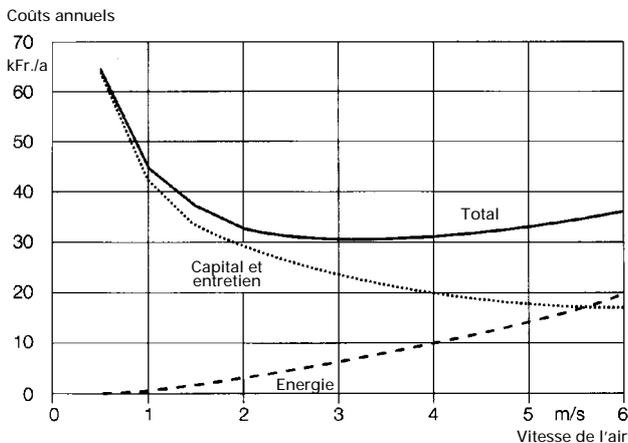


Figure 3.6: Frais annuels en fonction de la vitesse de l'air dans l'appareil de traitement d'air (exemple calculé tiré de [3.1]).

3.4.4.4 Réseau de gaines

Les pertes de charge du réseau peuvent être maintenues à un minimum avec des chemins courts, une vitesse réduite, respectivement des pertes de charge réparties et singulières faibles. Il est aussi important que les calculs de perte de charge soient fiables, de manière à pouvoir renoncer aux organes d'équilibrage.

La figure 3.7 présente un exemple de frais d'exploitation totaux en fonction de la vitesse de l'air dans le réseau de gaines. Comme pour les appareils de traitement d'air, une zone plate apparaît dans la courbe des frais totaux. Du point de vue énergétique, la vitesse d'air devrait être réduite jusqu'à ce qu'on note une nette augmentation des frais totaux.

Dans le canton de Zurich, la vitesse de l'air dans les canaux d'installation de ventilation et de climatisation ne doit pas dépasser les valeurs suivantes :

jusqu'à	1000 m ³ /h	3 m/s
jusqu'à	2000 m ³ /h	4 m/s
jusqu'à	4000 m ³ /h	5 m/s
jusqu'à	10 000 m ³ /h	6 m/s
plus de	10 000 m ³ /h	7 m/s

Il faut accorder une importance particulière à l'écoulement dans les pièces de forme et les pièces droites.

- A surface, vitesse et rugosité égales, les canaux ronds présentent les pertes de charge les plus faibles. Plus le rapport largeur-hauteur devient grand, plus les canaux rectangulaires deviennent défavorables. Un rapport de plus de 5:1 doit absolument être évité.
- La rugosité des canaux Eternit est 1,5 fois, celle des canaux isolés intérieurement 1,5 à 2 fois, supérieure à celle des canaux galvanisés.
- Les coudes rectangulaires devraient être arrondis à l'intérieur et munis d'aubes de guidage.
- Les coudes de section circulaire devraient être composés d'autant de segments que possible.

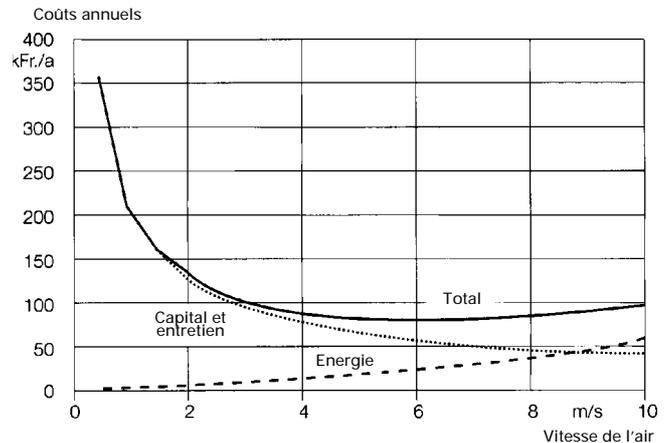


Figure 3.7 : Frais annuels en fonction de la vitesse de l'air dans le réseau de gaines (exemple calculé tiré de [3.1]).

Résumé

- La recommandation SIA 380/4 «L'énergie électrique dans le bâtiment» est pour l'instant encore en phase de développement.
- La SIA 380/4 est un outil permettant de saisir et de caractériser, de manière simplifiée, la consommation globale d'énergie électrique.
- Pour permettre la comparaison des indices de consommation, ils sont classés par prestation (p. ex. transport de l'air frais, climatisation) et pour une affectation identique (p. ex. bureaux).
- Pour pouvoir juger de l'indice de consommation, on a indiqué des valeurs limites et des meilleures valeurs. Ces valeurs peuvent être respectées si le bâtiment et l'installation sont performants du point de vue énergétique. Avec les connaissances actuelles, les meilleures valeurs peuvent être atteintes si on combine les meilleurs composants avec les meilleurs systèmes connus.

3.5 SIA 380/4 « L'énergie électrique dans le bâtiment »

3.5.1 Buts

Le but de la recommandation SIA 380/4 «L'énergie électrique dans le bâtiment» est d'utiliser rationnellement l'énergie électrique pour la lumière, le travail mécanique et le fonctionnement des équipements de production dans le bâtiment. Elle complète la recommandation SIA 380/1 «L'énergie dans le bâtiment» [3.6], qui traite essentiellement de l'utilisation de l'énergie thermique. La recommandation SIA 380/4 est un instrument global pour déterminer de manière simplifiée la consommation d'énergie électrique. Elle ne remplace pourtant pas les recommandations SIA 382/1-3 ou toutes autres normes et recommandations existantes.

3.5.2 Avancement du projet de recommandation

La recommandation SIA 380/4 a été mise en consultation du 1.1.1992 au 31.12.1992. Elle est actuellement remaniée sur la base des résultats de cette consultation.

3.5.3 Idées de base

Contrairement au domaine de la chaleur, la consommation d'électricité est déterminée par un grand nombre d'utilisateurs. Les indices de dépense d'énergie électrique de différents bâtiments ne peuvent être comparés que si l'utilisation en est similaire.

On peut comparer les prestations des divers équipements s'ils sont séparés par affectation comme le montre la figure 3.8.

En conséquence, il faut comparer les performances moyennes par prestation avec les valeurs limites, respectivement les meilleures valeurs. Il n'y a pas d'exigences concernant l'indice de dépense d'énergie. Toutes les valeurs sont rapportées à des surfaces brutes.

Ci-après, quelques explications sur le budget énergétique et la performance globale requise.

3.5.4 Budget énergétique pour la lumière, le travail mécanique et le fonctionnement des équipements de production

Dans le budget énergétique (tableau 3.6), on décompose la valeur absolue de l'énergie consommée par prestation et pour chaque unité d'exploitation.

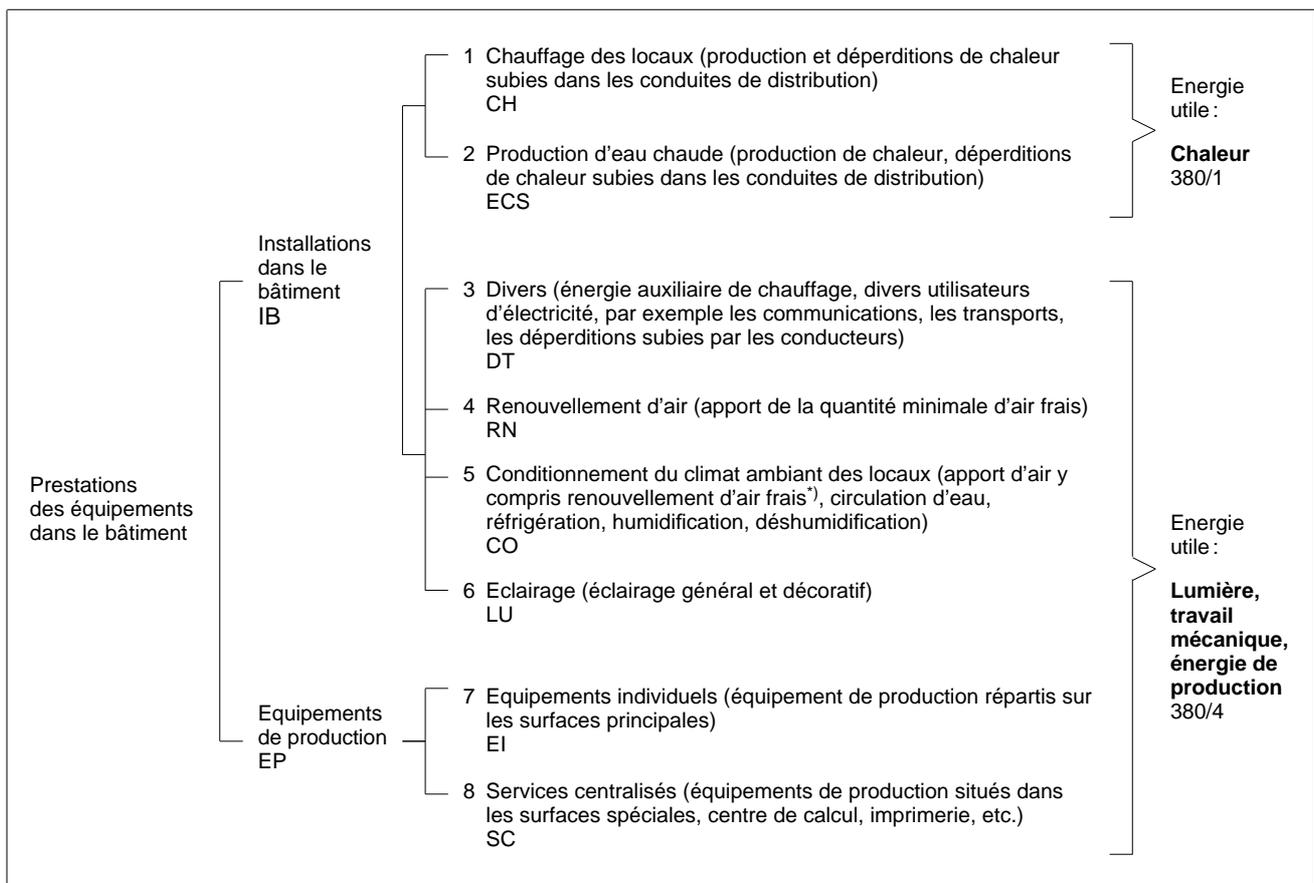
3.5.4.1 Prestation des équipements

La prestation de chaque équipement est un service fourni par un système technique. Il en résulte une consommation d'énergie. La figure 3.8 présente les différentes prestations et leur attribution aux recommandations SIA 380/1 et 380/4.

Budget énergétique [1000 kWh/a]								SIA 380/4	
Objet, lieu:									
Date:									
Ingénieur:									
Unité d'exploitation	Prestation	Installations du bâtiment IB				Equipements de production EP		Total	
		DT	RN	CO	LU	EI	SC	IB	IB+EP
		3	4	5	6	7	8	Σ 3-6	Σ 3-8
Bureau									
Surface de référence:	m ²	Indices de dépense d'énergie				E _{elb} (3-6):		MJ/M ² a	
Chauffage (1):	MWh/a					E _{el} (3-8):		MJ/M ² a	
Eau chaude (2):	MWh/a					E _{ch} (1-2):		MJ/M ² a	

Remplir soit RN (4) soit CO (5)

Tableau 3.6: Budget énergétique selon SIA 380/4 [3.7].



Remarques :

*) Les meilleures-valeurs ou les valeurs-limites se rapportent ainsi au seul renouvellement d'air, lorsqu'il n'y a pas de conditionnement du climat ambiant des locaux. Dans le cas de conditionnement des locaux, ces valeurs concernent l'apport complet d'air.

Figure 3.8: Les prestations et leur attribution aux recommandations SIA 380/1 et 380/4.

3.5.4.2 Unité d'exploitation

L'unité d'exploitation est une partie d'un bâtiment, caractérisée par un genre d'utilisation, par exemple

- bureau ;
- surface de vente ;
- salle de cours ;
- restaurant ;
- cuisine, etc.

3.5.4.3 Application pratique

Le budget énergétique est le fil conducteur d'un projet. Il est contrôlé lors de certaines phases ou lors de modifications notoires du projet. On peut ainsi plus facilement s'apercevoir d'un écart et y remédier de façon appropriée.

Le budget énergétique permet de déterminer des valeurs de contrôle. Celles-ci doivent être techniquement mesurables, et mesurées lorsque l'installation est en service.

Le but de ces contrôles est de comparer les valeurs à l'exploitation avec celles du projet et de corriger les erreurs de fonctionnement. Le relevé périodique du budget énergétique devrait permettre de saisir l'influence des modifications effectuées.

En règle générale, on ne mesure pas une consommation d'énergie à la réception de l'installation, mais plutôt des puissances ou des valeurs, comme par exemple des pertes de charge ou des débits d'air, qu'on peut ensuite comparer avec les valeurs utilisées pour les calculs préalables.

3.5.5 Performance globale requise

La performance globale requise représente la limite maximale de la puissance moyenne de l'unité d'exploitation rapportée au temps d'utilisation normal. Elle s'exprime en W/m^2 .

Les gros consommateurs d'énergie (valeur spécifique) ressortent grâce au tableau des puissances moyennes en W/m^2 .

La recommandation SIA 380/4 propose des formules pour une présentation unifiée et une meilleure compréhension de ces valeurs.

3.5.5.1 Classification

La recommandation SIA 380/4 définit des classes pour les différents niveaux de chaque prestation ; par exemple pour le conditionnement des locaux (CO) de bureaux, la classification suivante est proposée :

Conditionnement des locaux de bureaux	
Classe	Apport de chaleur
CO1	0-20 W/m ²
CO2	20-30 W/m ²

Tableau 3.7 :
Classification des apports de chaleur des bureaux [3.7].

3.5.5.2 Valeur-limite et meilleure valeur

Valeur-limite

La valeur-limite est un niveau d'exigence, auquel doit répondre toute construction ou installation de bonne qualité énergétique, satisfaisant les besoins du maître de l'ouvrage, construite et exploitée de manière économique. Dans la démarche utilisant les performances globales requises, la valeur-limite doit être respectée.

Meilleure valeur

La meilleure valeur peut être obtenue par la meilleure combinaison possible des meilleurs composants ou des systèmes mis au point sur le plan technique. Un supplément d'investissement peut être nécessaire par rapport à l'optimum économique. La faisabilité doit être examinée de cas en cas. Le terme « meilleure valeur » ne correspond pas au terme « valeur-cible » de la SIA 380/1.

Valeur de l'ouvrage

La valeur de l'ouvrage est déterminée pendant l'étude ou mesurée pendant l'exploitation. Elle devrait se situer entre la valeur-limite et la meilleure valeur.

3.5.5.3 Application pratique

On oppose des valeurs de références à la valeur de l'ouvrage. La valeur-limite tient lieu d'exigence minimale à respecter. La qualité énergétique de la planification est donnée par la classe et la valeur de l'ouvrage.

Bibliographie chapitre 3

- [3.1] Office fédéral des questions conjoncturelles
Manuel RAVEL
L'électricité à bon escient
ISBN 3-905233-12-6, 1993
- [3.2] ISO/IS 7730
Moderate thermal environments - determination of the PMV and PPD indices and specifications of the conditions for thermal comfort
A commander à : Schweizerische Normenvereinigung SNV, 8032 Zürich
- [3.3] Regierungsrat des Kantons Zürich
Besondere Bauverordnung I
Edition mars 1991
- [3.4] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Isolation thermique des bâtiments
Norme SIA 180, édition 1988
- [3.5] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Protection contre le bruit dans le bâtiment
Norme SIA 181, édition 1988
- [3.6] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
L'énergie dans le bâtiment
Recommandation SIA 380/1, édition 1988
- [3.7] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
L'énergie électrique dans le bâtiment
Recommandation SIA 380/4, projet pour une phase d'essai de janvier à décembre 1992
- [3.8] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Performances techniques requises pour les installations de ventilation et de climatisation
Recommandation SIA V382/1, édition 1992
- [3.9] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Puissance de réfrigération à installer dans le bâtiment
Recommandation SIA V382/2, édition 1992
- [3.10] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Ergänzungen zur Berechnungsmethodik in der Empfehlung SIA V382/2
Dokumentation D 088, édition 1992
- [3.11] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Preuve des besoins pour les installations de ventilation et de climatisation
Recommandation SIA V382/3, édition 1992
- [3.12] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Puissance thermique à installer
Recommandation SIA 384/2, édition 1982
- [3.13] Conseil fédéral suisse
Ordonnance sur la protection de l'air du 16 décembre 1985 avec modification du 20 novembre 1991
(OPAIR 1992)

4. Systèmes de ventilation et de climatisation

4.1	Prestations de planification	53
4.1.1	Mise au concours	53
4.1.2	Travaux de conception préalable	53
4.1.3	Planification d'installations énergétiquement performantes	54
4.1.4	Mise en service, réception et contrôles ultérieurs	55

4.2	Choix des installations	56
4.2.1	Possibilités et limites de la ventilation par les fenêtres	58
4.2.2	Extraction mécanique	59
4.2.3	Installations de ventilation et de climatisation avec air pulsé et air évacué	60
4.2.4	Extraction de chaleur et de substances nocives	60

4.3	Récupération de chaleur (RC)	63
-----	------------------------------	----

4.4	Ventilation de logements	68
-----	--------------------------	----

4.5	Nécessité du refroidissement de l'air ambiant	71
-----	---	----

4.6	Nécessité d'humidifier l'air ambiant	71
-----	--------------------------------------	----

4.7	Aération nocturne	72
-----	-------------------	----

4.8	Refroidissement de dalle en béton	73
-----	-----------------------------------	----

4.9	Plafonds froids	75
-----	-----------------	----

4.10	Registre terrestre à air	76
------	--------------------------	----

4.11	Sondes géothermiques	79
4.11.1	Chauffage en hiver	71
4.11.2	Refroidissement en été	80

4.12	Commande et régulation en fonction des besoins	81
------	--	----

4.13	Installations à débit variable (VAV)	82
------	--------------------------------------	----

	Bibliographie chapitre 4	83
--	--------------------------	----

4. Systèmes de ventilation et de climatisation

4.1 Prestations de planification

4.1.1 Mise au concours

Lors d'une mise au concours, il faudrait que l'aspect consommation d'énergie fasse partie du cahier des charges et qu'au moment du dépouillement, ces problèmes soient effectivement pris en compte par le jury, au même titre que les aspects architecturaux. Il ne s'agit pas de produire un concept détaillé des installations techniques du bâtiment, mais bien plus d'en poser et contrôler les principes déterminants. Pour analyser les projets, il faut tenir compte des critères d'analyse suivants :

- Concept énergétique (technologies prévues, utilisation de sources d'énergie renouvelables, faisabilité, complexité). Un concept tenant bien compte de la lumière du jour, permet des solutions avantageuses du point de vue des installations techniques du bâtiment. Un bon concept énergétique fait appel à la capacité d'accumulation thermique du bâtiment en complément aux installations techniques habituelles (chauffage, ventilation, éventuellement climatisation).
- Répartition en zones en fonction du type de local, respectivement de son utilisation (partage en zones à ventilation naturelle et mécanique aux exigences différentes).
- Concept de centrales et de gaines techniques (raccordements horizontaux et verticaux), devant permettre des liaisons aussi courtes que possible entre prise d'air extérieur, centrale et locaux.
- Possibilités de modifications ultérieures.
- Investissement et rentabilité.

Pour atteindre ces buts, il faudrait qu'un expert en énergie et installations du bâtiment collabore à la rédaction du cahier de concours et qu'il soit représenté dans le jury.

4.1.2 Travaux de conception préalable

Encore aujourd'hui, pour beaucoup de projets de construction, on n'effectue pas ou seulement de façon très rudimentaire, des études préalables concernant le genre et la nécessité d'installations de ventilation ou de climatisation. Il en va de même pour d'autres études en matière de conception d'installations du bâtiment, en particulier

Résumé

- L'analyse de l'interaction entre le bâtiment et ses installations techniques est primordial, lorsqu'on veut étudier globalement les besoins en énergie.
- Beaucoup de problèmes fondamentaux en matière d'énergie doivent être traités tout au début du projet. L'architecte et l'ingénieur spécialisé doivent donc travailler ensemble le plus tôt possible !
- Les travaux de planification sérieux prennent du temps. Ces travaux méritent d'être rétribués correctement. Souvent, une rétribution sur la seule base du montant des travaux offre peu d'attraits pour planifier des installations énergétiquement performantes.
- Pour qu'une installation fonctionne comme prévu, il est nécessaire de procéder à des contrôles approfondis lors de la mise en service, de la réception, ainsi que lors des contrôles ultérieurs.

concernant le lien entre les installations du bâtiment et le bâtiment lui-même (concept global). La raison provient certainement du fait qu'à ce jour, la rémunération d'un tel travail n'est pas réglée de façon satisfaisante et que, par conséquent on ne s'attache pas les services d'un ingénieur spécialisé pour ces tâches.

Ce problème de rémunération adéquate du travail de conception préalable peut être résolu dans le cadre du règlement des honoraires SIA 108 [4.16] en adjoignant ces travaux à la phase 0 (phase des études préalables) et en les indemnisant séparément.

La nécessité de ces études préalables n'est souvent pas assez reconnue, tant par les maîtres de l'ouvrage, que par les architectes et mêmes certains ingénieurs spécialisés. La solution d'honorer la phase 0 et de déduire ensuite ce montant sur les phases suivantes n'est pas satisfaisante. Avec de telles pratiques, il deviendrait difficile d'avoir des avis neutres et fondés et dans le cas où on s'adjoint un conseiller séparé pour la phase 0, il pourrait se produire des conflits inutiles avec l'ingénieur spécialisé des phases suivantes.

4.1.3 Planification d'installations énergétiquement performantes

Une installation conçue pour économiser l'énergie et dimensionnée au plus juste, réduit en général les coûts d'investissement, mais occasionne par contre plus de travail de planification et est souvent liée à un risque plus élevé pour l'ingénieur spécialisé. L'intérêt des planificateurs pour concevoir des installations économes en énergie est donc souvent limité, car ils craignent des frais plus élevés pour des honoraires plus bas. L'extrême se produisant lorsque la conclusion des études montre que grâce à toutes les mesures planifiées, on peut se passer d'installation de ventilation. Comment honorer les travaux de l'ingénieur dans ce cas?

A longue échéance, il faudra revoir le règlement pour les honoraires en fonction de ce problème. Il existe une solution avec le règlement pour les honoraires actuel. Il faut pour cela, tout d'abord, que les mandants soient convaincus que les installations plus simples ou dimensionnées au plus juste correspondent à un degré de difficulté plus élevé que des installations conventionnelles largement dimensionnées. D'autre part, les planificateurs devront être assez performants pour

concevoir même des installations simples avec un niveau technique élevé. Par là, on entend bien sûr une planification d'un niveau technique élevé et non une installation avec des équipements luxueux et très techniques (donc chers).

4.1.4 Mise en service, réception et contrôles ultérieurs

Les principes de base de la réception d'installations de ventilation et de climatisation sont définis au chapitre 4 de la recommandation SIA V382/1 [4.17].

En effectuant des mesures sur des installations existantes, même conventionnelles, on constate qu'elles ne fonctionnent le plus souvent pas comme prévu. Le peu de mesures effectuées en général, laisse supposer que ces défauts restent souvent ignorés, faute d'avoir effectué des mesures exhaustives lors de la réception.

Le règlement concernant les prestations et honoraires SIA 108 prévoit pour la ventilation, une part de 10% des honoraires pour direction technique des travaux y compris réception, dans la prestation partielle 12 et une autre part de 10% pour la phase finale, y compris direction des travaux de garantie. Ces honoraires devraient permettre d'effectuer une réception fiable ainsi que le contrôle des défauts à éliminer. La difficulté réside peut-être plutôt dans l'absence de contrôle réciproque entre le concepteur et l'installateur.

Pour améliorer cette situation, on peut observer les deux points suivants :

- Appliquer de façon plus conséquente la procédure de réception, c'est-à-dire remplir complètement les procès-verbaux de réception SIC 88-1 F [4.20] et effectuer toutes les mesures et tous les constats nécessaires pour chaque installation de ventilation ou de climatisation.
- Effectuer un contrôle ultérieur. Ceci peut être fait par le maître de l'ouvrage, le planificateur ou une tierce personne indépendante. Dans ce dernier cas, ce serait un atout si ce tiers connaissait déjà l'installation, par exemple au travers d'une collaboration lors de la phase 0. On peut par exemple rémunérer ces contrôles ultérieurs de la façon suivante: premier contrôle à la charge du M.O. Si le contrôle révèle des défauts, les contrôles ultérieurs sont à la charge de celui auquel les défauts constatés sont imputables.

Résumé

- A l’avenir, avec l’aide de nouvelles lois sur l’énergie et des recommandations SIA V382/1-3, on devrait pouvoir planifier des installations de ventilation et de climatisation performantes du point de vue énergétique, ainsi que vérifier de façon critique la nécessité de refroidir ou d’humidifier l’air ambiant.
- Des concepteurs peu regardants jusqu’ici, seront surtout confrontés à des changements dans leur planification. Pour la plupart des installations, des recommandations limitant la vitesse maximale de l’air ou de la perte de charge sont indiquées (chiffre 3.4.4). Une déviation vers le haut ou vers le bas est toutefois admissible dans certains cas isolés, lorsqu’on peut le justifier.
- Pour l’analyse globale des besoins en énergie, il faut tenir compte de la polyvalence de l’énergie électrique. D’une façon générale, il faut la pondérer (par exemple pour le transport de l’air) avec un facteur 3, et l’énergie thermique pour chauffage et refroidissement avec un facteur 1.
- Il faut insister pour que le débit d’air pulsé soit égal au débit d’air frais hygiénique, réduire autant que possible toutes les sources de chaleur et de polluants à l’intérieur des locaux (réduction à la source). Si le débit d’air pulsé est malgré tout insuffisant pour évacuer toute la charge thermique, il faut prévoir un refroidissement par rayonnement ou un système de refroidissement recyclant l’air localement (chiffre 3.3).

4.2 Choix des installations

La figure 4.1 donne un aperçu de la procédure générale à suivre lors de la planification selon SIA V382/3 [4.19].

Les trois stratégies de ventilation – aération par les fenêtres, installation mécanique d’extraction d’air, installation de ventilation et climatisation avec air pulsé et évacué – sont en principe possibles, pour autant qu’il y ait des fenêtres et que leur ouverture n’occasionne pas de nuisances excessives (voir 3.1.4 de ce document, respectivement chiffre 3 de SIA V382/3, en particulier le bruit).

La construction d’installations de ventilation ou d’extraction d’air est justifiée, si les nuisances extérieures sont élevées, lorsque les locaux sont borgnes ou si les exigences quant à l’exploitation sont élevées.

Ces arguments seuls ne justifient pas le refroidissement ou l’humidification de l’air ambiant. Ces points doivent être justifiés séparément, selon SIA V382/3 (chiffres 4.5 et 4.6).

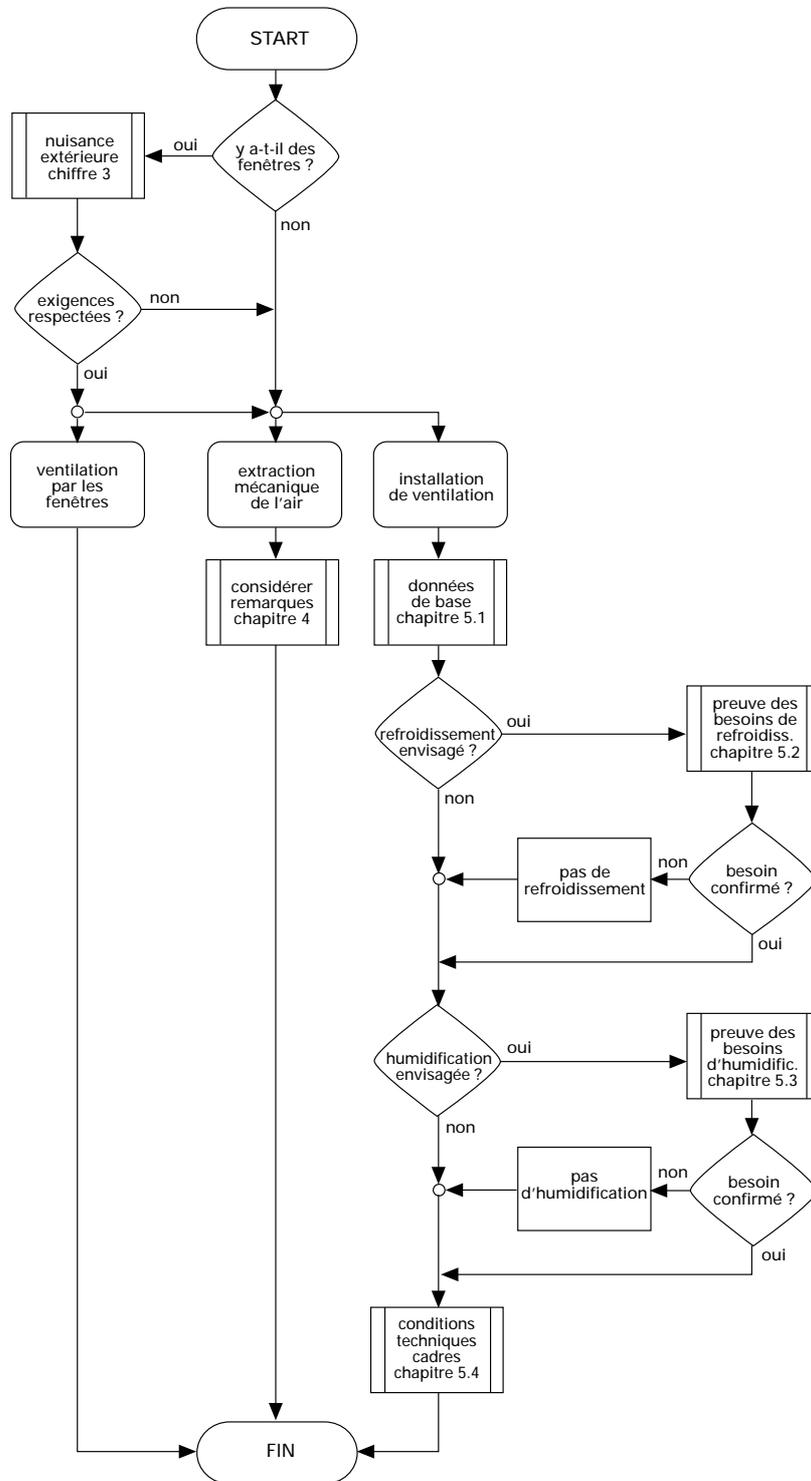


Figure 4.1 : Démarches à effectuer lors de la conception selon SIA V382/3 [4.19]. (Les indications de paragraphe se rapportent à SIA V382/3.)

4.2.1 Possibilités et limites de la ventilation par les fenêtres

Lors de l'ouverture des fenêtres, le renouvellement de l'air se fait par à-coups.

En hiver, lorsque l'air extérieur est plus froid que l'air intérieur, et lorsqu'il n'y a pas de vent, l'air froid pénètre par la partie inférieure de l'ouverture, alors que l'air chaud s'en va par la partie supérieure. Il est alors impossible d'éviter les courants d'air, même dans les locaux équipés de radiateurs sous les fenêtres. Le renouvellement de l'air doit donc être rapide et de courte durée. Ce système n'est pas adéquat pour une aération continue en hiver. Il est par contre valable du point de vue énergétique pour une aération courte et intensive car il évite un refroidissement excessif du bâtiment.

En été, l'intensité de la ventilation par les fenêtres dépend essentiellement du vent, mais aussi de la différence de température des façades due à l'ensoleillement.

Lorsque la ventilation est transversale, c'est-à-dire qu'on ouvre en même temps des fenêtres sur plusieurs côtés du bâtiment, le renouvellement de l'air est particulièrement rapide et il peut, en quelques minutes, être complet.

Le tableau 4.1 contient des valeurs indicatives grossières du renouvellement horaire moyen qu'on peut obtenir avec la ventilation par les fenêtres.

La ventilation la plus favorable s'obtient au moyen de fenêtres coulissantes ou avec d'autres systèmes permettant de modifier la taille de l'ouverture en fonction des besoins. Mais même ce système de ventilation (utilisé en continu) ne peut pas garantir un renouvellement d'air donné.

Avantages de la ventilation par les fenêtres

- Le renouvellement d'air le plus simple et le meilleur marché.
- Pas de consommation d'énergie pour le transport de l'air.
- Bien acceptée par les utilisateurs.
- En été, possibilité d'aérer de façon intensive la nuit et le matin.

Inconvénients de la ventilation par les fenêtres

- Pas de contrôle du renouvellement d'air.
- Courants d'air en hiver.

Position des fenêtres	Renouvellement d'air
Fenêtres, portes fermées*	0 - 0,5 h ⁻¹
Fenêtres basculées, pas de stores	0,3 - 1,5 h ⁻¹
Fenêtres à moitié ouvertes	5 - 10 h ⁻¹
Fenêtres complètement ouvertes	10 - 15 h ⁻¹
Fenêtres ouvertes sur façades opposées	jusqu'à 40 h ⁻¹

* Infiltration par les joints de battues.

Tableau 4.1 : Valeurs indicatives grossières pour le taux de renouvellement d'air obtenu par ouverture des fenêtres [4.13].

- Eventuellement conflits dans des bureaux collectifs.
- Pas de récupération de chaleur.
- Pas de traitement de l'air.
- Eventuellement nuisances dues au bruit et à la pollution.
- Eventuellement problèmes de sécurité (aération nocturne).

Lorsqu'il est question de remplacer la ventilation par les fenêtres, par une ventilation mécanique, il faut comparer l'économie d'énergie qu'offre en hiver la récupération de chaleur, avec la dépense d'énergie nécessaire au transport de l'air. Selon les données du paragraphe 5.2.6 de la recommandation SIA V382/3 pour la définition d'installations énergétiquement très performantes, il faut pondérer l'énergie électrique nécessaire pour le transport de fluides (air et eau) avec un facteur 3, l'énergie thermique pour le chauffage, et le cas échéant le refroidissement, avec un facteur 1.

Du point de vue énergétique, on atteint en général les limites de la ventilation par les fenêtres, lorsque l'apport d'air extérieur nécessaire durant l'occupation d'un local dépasse environ $1,7 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (ce qui correspond à un renouvellement moyen d'environ $0,7 \text{ h}^{-1}$ pour une hauteur libre de 2,50 m). La cause peut être due à une occupation dense (moins d'environ $15 \text{ m}^2/\text{pers.}$) ou une émission intense de substances nocives (si, par exemple, on fume sur une surface spécifique de moins de $30 \text{ m}^2/\text{pers.}$). Ce problème est illustré par des exemples de calculs en [4.22].

Pour des bureaux individuels ou petits bureaux collectifs, la ventilation par les fenêtres est en général la solution la mieux acceptée par les utilisateurs. On peut voir surgir des conflits si trop de personnes doivent se mettre d'accord pour ouvrir les fenêtres.

4.2.2 Extraction mécanique

L'air du local est aspiré par un ventilateur et expulsé à l'air libre pendant que, par suite de la dépression provoquée, l'air des locaux voisins ou de l'extérieur pénètre par des ouvertures créées intentionnellement ou involontairement. Si on veille à un bon cheminement de l'air, l'extraction mécanique est alors le moyen le plus simple pour améliorer la qualité de l'air.

Pour ces installations sans traitement d'air et sans amenée mécanique d'air frais, il y a lieu, selon chiffre 4 de SIA V382/3 [4.19], d'observer les principes suivants :

- L'installation d'extraction mécanique doit être pilotée de manière à permettre l'évacuation de l'air de chaque local raccordé, en fonction de ses besoins.
- Lorsqu'il s'agit d'installations d'évacuation centralisées, le dimensionnement du ventilateur doit tenir compte du facteur de simultanéité de l'utilisation. Un entraînement à plusieurs allures ou à vitesse variable est souhaitable, afin de permettre l'adaptation de l'exploitation aux besoins variables.
- Lorsque les débits d'air extraits de locaux chauffés dépassent 2500 m³/h, il faut envisager une installation de récupération de chaleur permettant de préchauffer l'alimentation d'air neuf.
- Prendre garde à respecter les cloisonnements coupe-feu.

4.2.3 Installations de ventilation et de climatisation avec air pulsé et air évacué

Selon SIA V382/1, les installations de ventilation et de climatisation comprennent un système d'air pulsé et un système d'air repris. On différencie quatre types d'installations, en fonction du traitement de l'air appliqué, selon tableau 4.2.

Les locaux ne devraient être refroidis ou humidifiés que si c'est vraiment nécessaire. Les directives relatives à ce sujet se trouvent aux paragraphes 4.5 et 4.6.

4.2.4 Extraction de chaleur et de substances nocives

Le principe de base, pour réaliser une installation aérodynamique performante au niveau énergétique, c'est d'utiliser toutes les possibilités pour diminuer les émissions/immissions de chaleur ou de substances nocives survenant dans le local (lutte contre les sources). Il faut éviter d'augmenter le flux d'air uniquement pour diluer et évacuer des émissions qu'on aurait pu empêcher.

Type d'installation	Traitement de l'air soufflé*			
	F	C	H	R
Installation de ventilation	●	●		
Installation de ventilation avec humidification	●	●	●	
Installation de ventilation avec réfrigération	●	●		●
Installation de climatisation	●	●	●	●

* F = filtration
 C = chauffage
 H = humidification
 R = refroidissement, déshumidification (réglée individuellement ou associée au processus de refroidissement)

Tableau 4.2: Opérations mises en jeu dans les installations de ventilation et de climatisation [4.17].

Mesures pour réduire la charge thermique dans le local :

- Toutes les surfaces vitrées d'un local refroidi doivent disposer d'une protection solaire efficace. En général, on essaie d'atteindre un taux de passage d'énergie globale, y compris protection solaire, de $g = 0,15$ ou moins. Des valeurs indicatives pour différents types de construction se trouvent sous chiffre 7 3 2 de la recommandation SIA V 382/2 (voir aussi paragraphe 4.5).
- Choix de machines et d'appareils économisant l'énergie, concept d'éclairage adéquat. Utilisation seulement en fonction des besoins.
- Lorsqu'il y a des sources ponctuelles importantes, il faut envisager un refroidissement à eau ou une extraction directe par un système d'aération autonome ou une hotte d'aspiration, afin que la chaleur ne se dissipe pas dans tout le local. Il est éventuellement aussi possible de mettre les appareils à fort dégagement de chaleur dans un local adjacent où on peut admettre une température ambiante plus élevée.

Mesures pour la réduction de l'émission de substances nocives dans le local :

- Choisir des matériaux de construction et des installations intérieures pauvres en émissions de substances nocives. Des informations sur les émissions des principaux matériaux de construction seront publiées par la SIA.
- Si de plus grandes sources de substances nocives ne peuvent pas être évitées, il faut envisager une extraction directe par un système d'aération fermé ou par une hotte d'aspiration. Il peut aussi être utile de placer une telle source dans un local adjacent.
- Si on est confronté à différentes sortes d'émissions de substances nocives (par exemple avec et sans fumeurs), il faut envisager une séparation physique des locaux.

Si, pour répondre aux critères hygiéniques, il faut augmenter le débit d'air pour évacuer la charge thermique, il est alors conseillé sur le plan énergétique, d'utiliser localement des appareils de refroidissement, fonctionnant en air de roulement ou par rayonnement, avec de l'eau comme caloporteur.

Le mouvement d'air dans le local, et par là même l'efficacité de la ventilation, sont déterminés par la position et le type des ouvertures d'insufflation et

de reprise, le type et la disposition des sources de chaleur, ainsi que la température des surfaces de l'enceinte. Du point de vue énergétique, il faut choisir des systèmes qui sont efficaces sans qu'on dépasse le taux d'air extérieur hygiénique nécessaire. Ceci peut se faire avec les systèmes traditionnels de ventilation par induction, tout comme avec le système, de plus en plus utilisé, de ventilation par déplacement d'air (Quellüftung). Il faut éviter les effets de court-circuit, où l'air pulsé passe directement dans l'air vicié, sans avoir ventilé la zone occupée.

Dans le cas d'une ventilation par déplacement d'air, le mouvement d'air sera dominé par un flux ascendant, en présence de sources de chaleur dans le local. Sans sources de chaleur, l'air pulsé plus froid, et donc plus lourd, s'écoule doucement au niveau du sol et force l'air ambiant plus chaud vers le haut dans les grilles d'évacuation. Ce mouvement ne doit pas être confondu avec le flux laminaire des salles blanches.

Ces dernières années, on a entrepris en Suisse, sur la base de recherches norvégiennes et danoises [4.10], de gros efforts pour mieux comprendre les phénomènes de mouvement d'air dans des locaux ventilés et les effets de nouveaux systèmes comme la ventilation par déplacement d'air ou les plafonds froids. Les résultats de ce programme de recherche « Ventilation et énergie dans le bâtiment » seront publiés pour le praticien dans une collection documentaire de sept volumes (voir paragraphe 1.4.2, en particulier VEB 7).

4.3 Récupération de chaleur (RC)

Pour des raisons énergétiques, il faut prêter attention aux effets suivants d'une installation de RC :

- Réduction de la demande en énergie pour réchauffer et éventuellement humidifier l'air extérieur.
- Augmentation de la demande en énergie pour le transport de l'air par suite de la perte de charge des systèmes RC (éventuellement y compris filtres air évacué). Peut-être qu'il y aura aussi une demande accrue d'énergie électrique pour des installations auxiliaires (par exemple circuit intermédiaire à eau glycolée).

Les installations RC économisent de l'énergie de chauffage. Si leur dimensionnement est adéquat, d'autres composants de l'installation pourront être choisis plus petits. En effet, le système RC a le meilleur rendement aux conditions extrêmes (différence de température, respectivement d'enthalpie, la plus grande), ce qui lui permet de couper les pointes de charge.

Pour planifier correctement une installation de RC, il convient de connaître non seulement le rendement des composants au point d'exploitation idéal, mais aussi leur comportement lors de conditions d'exploitation différentes.

Comme les installations RC utilisent aussi de l'énergie, il faut finalement s'intéresser au produit net. C'est pourquoi les installations RC ne doivent pas être calculées en fonctions des conditions extrêmes, mais pour le meilleur gain annuel.

On fait une différence entre le rendement maximal possible et le rendement optimal de la récupération. Dans une installation de ventilation, l'installation RC optimale sera différente s'il y a beaucoup ou peu de charges internes à récupérer.

Lors de la conception, il faut aussi tenir compte de bien des conditions non techniques, comme le prix pour combustibles fossiles et électricité, le taux de renchérissement, l'intérêt du capital actuel et futur, le temps d'amortissement et les buts généraux de l'effort d'économie.

Résumé

- A quelques exceptions près, les installations de ventilation et de climatisation seront équipées de RC.
- Le choix du système se fait en fonction des conditions cadres spécifiques à l'objet. Il n'existe pas de système qui satisfasse à tous les besoins.
- Le succès d'une RC dépend du soin apporté à son dimensionnement. Le critère déterminant est le gain annuel net en énergie. Ne pas oublier de pondérer l'éventuelle demande en énergie électrique avec un facteur de 3 (énergie thermique = fact.1).
- Du point de vue économique, une installation de RC judicieusement dimensionnée est, dans la majorité des cas, un investissement rentable, même au prix actuel (trop bas) de l'énergie.

L'installation de RC optimale n'est donc pas seulement déterminée par des données techniques, mais aussi par des hypothèses économiques et écologiques.

Avant de planifier une installation RC, il faut tout d'abord procéder à une analyse de minimisation des besoins. D'autre part, une répartition rationnelle des installations, ainsi que des moyens de commande et de régulation adaptés, sont des conditions importantes pour un fonctionnement économe et conforme aux besoins.

Pour les études préliminaires, le concepteur peut s'appuyer sur différentes publications récentes. Des données utiles se trouvent dans la brochure [4.8], ainsi que dans la directive 89-1 F de la SICC [4.21] que tout concepteur devrait connaître.

La figure 4.2 donne un premier aperçu des différents systèmes RC possibles selon les situations.

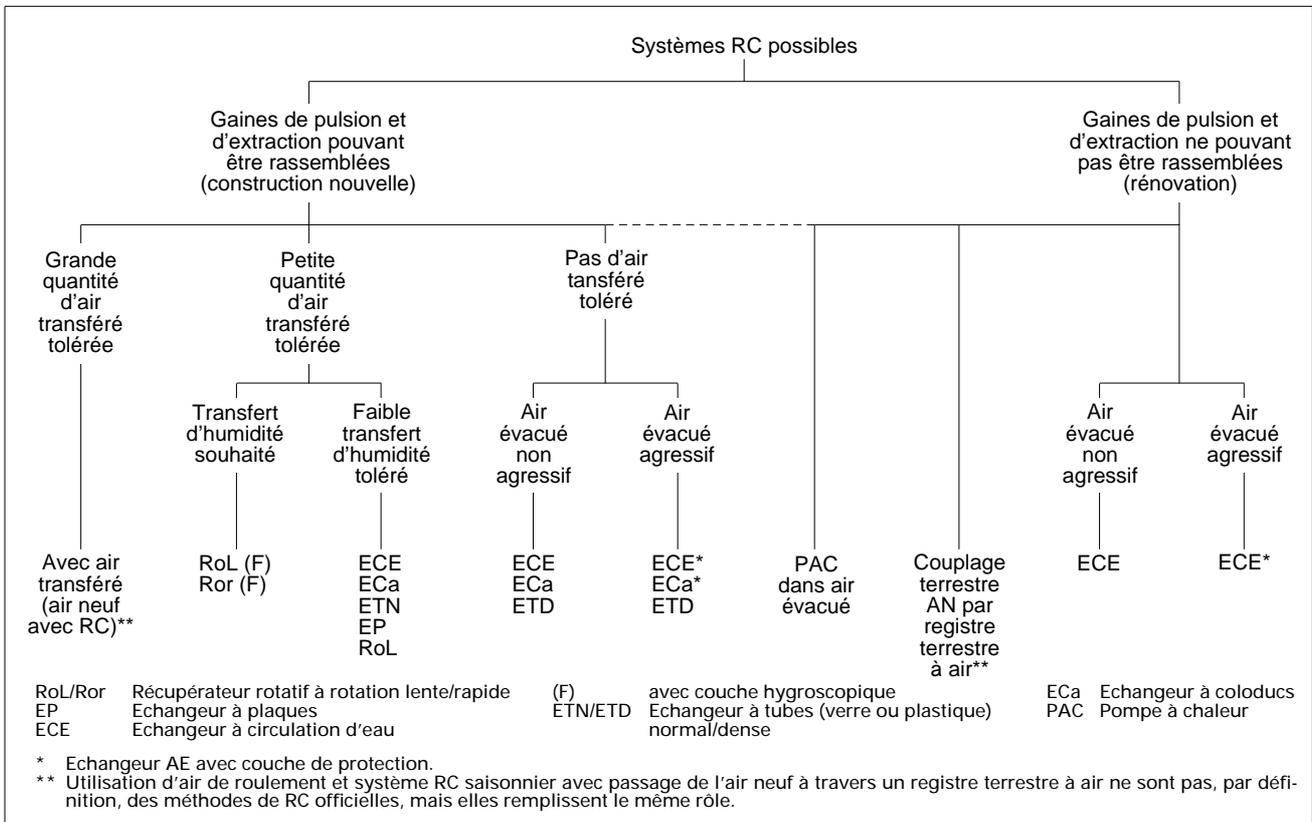


Figure 4.2: Tableau de critères pour la sélection grossière d'un système [4.8 complété].

Les différents systèmes de RC entrant en ligne de compte devraient être dimensionnés et optimisés à l'aide des données des fabricants, en fonction des conditions cadres déterminées par le site et les techniques utilisées.

Malheureusement, à ce jour, seuls les échangeurs à circulation d'eau se laissent optimiser de façon sûre par calcul. Pour les autres systèmes (en particulier pour les échangeurs rotatifs régénératifs), les bases manquent encore, respectivement sont encore à l'étude.

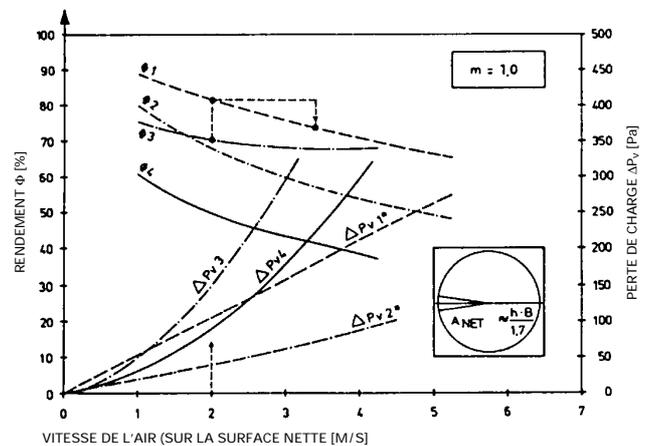
La figure 4.3 montre que les rendements et les pertes de charge des différents systèmes de RC doivent être comparés à vitesse d'air identique.

Dans la pratique, les limites sont souvent données par la place disponible. Celles-ci font que les comparaisons doivent être relativisées. Par exemple, si l'on veut comparer l'échangeur à circulation avec l'échangeur rotatif, il faut d'abord déterminer les vitesses d'air dans les échangeurs.

Dans un monobloc, la vitesse frontale sur le rotor est environ 1,5 à 1,7 fois supérieure à celle d'une batterie à eau glycolée, où la place à disposition peut mieux être exploitée. Cette augmentation de vitesse due au manque de place, réduit de 5 à 10 % l'efficacité du système rotatif. De telles relations, qu'on ne reconnaît souvent pas tout de suite lors d'un travail de routine, font apparaître la nécessité de comparer uniquement des solutions concrètes.

Pour des raisons économiques, l'échangeur à plaques est pratiquement la seule solution pour de petites installations. Mais même pour ce système, il manque encore à ce jour des données de planification satisfaisantes. En particulier, les fabricants devraient publier des données plus précises sur le danger de gel et les contre-mesures correspondantes [4.2].

Dans le travail pratique de conception, l'ingénieur avance normalement par étapes. Un instrument utile pour les premières études de systèmes est la courbe de fréquence de températures cumulées du site choisi (voir figure 4.4). Si on doit aussi jouer avec l'humidification et la déshumidification, la courbe cumulée pour l'humidité absolue est aussi utile. Contrairement à l'utilisation de la



- 1 Echangeur rotatif ET12, RT10, PT10
 - 2 Echangeur rotatif ET7, PT5
 - 3 Echangeur à eau glycolée 10RR/2,5 mm, A (net) = h · B
 - 4 Caloduc 6RR/3,2 mm, droit
- * Selon prospectus, invraisemblable

Figure 4.3 : Exemple de comparaison de performances [4.8].

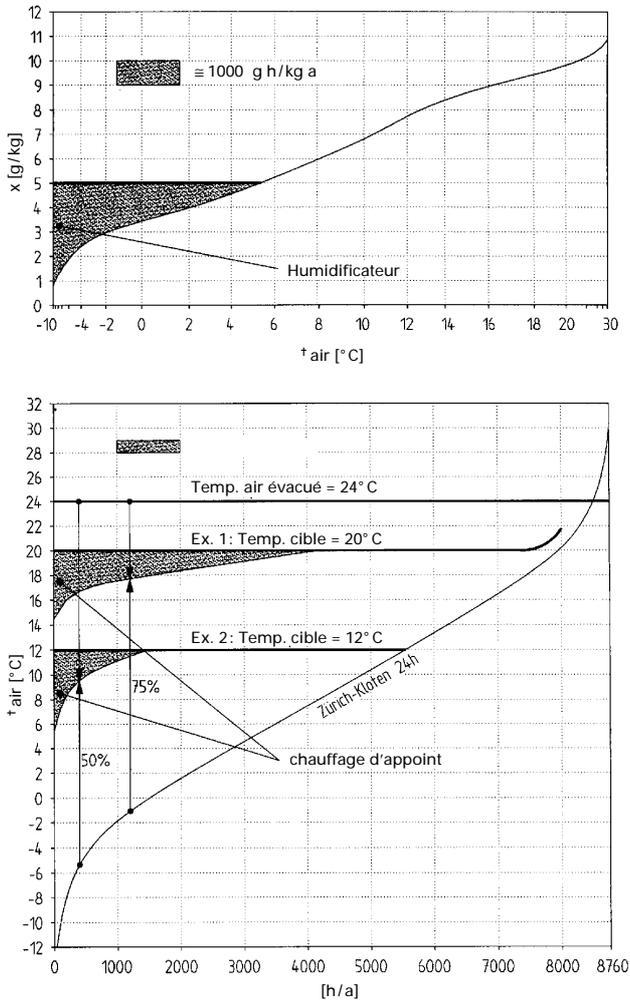


Figure 4.4 : Exemple pour le dimensionnement d'un système de RC avec courbes cumulées de température et d'humidité.

courbe de fréquence d'enthalpie cumulée, on pourra montrer et juger de façon différenciée, l'incidence de variations de température et d'humidité. Des données météorologiques pour différents lieux de Suisse se trouvent en [4.14].

Dans le cas N° 2 de l'exemple de la figure 4.4 (température-cible de 12° C) une RC de 50% suffit tout autant (ou même mieux) qu'une RC de 75% dans le cas no 1, où l'air doit être chauffé à une température-cible de 20° C.

A ce stade, l'estimation des rendements des différentes systèmes est suffisamment précise. Il n'est pas rare qu'un tel travail de préparation amène à réétudier le système général et par là, à améliorer les conditions limites.

Un des avantages de cette méthode est de permettre la comparaison graphique des degrés-heures (DH) résultants par année pour différentes solutions. La quantité de chaleur annuelle se calcule en multipliant les DH par le flux massique et par la chaleur spécifique moyenne. Lorsqu'il faut tenir compte de l'humidification, respectivement déshumidification, on introduit en plus la courbe cumulée de l'humidité absolue, la surface équivalente étant exprimée par des grammes-heures par an.

Lorsqu'on dispose de ces études, il est judicieux de prendre contact avec les fournisseurs des différents équipements. Suivant leurs connaissances et leurs possibilités techniques, ils pourront proposer une optimisation plus ou moins fiable. Au plus tard, au début de l'étude d'exécution, le concepteur doit clairement faire savoir que seuls entrent en ligne de compte des composants pour lesquels les fournisseurs sont en mesure de répondre aux questions précises suivantes :

- pour des installations moyennes à grandes, optimisation détaillée, vérifiable, dans le cadre des différentes variantes d'exécution, selon les critères d'optimisation choisis. Dans ce domaine se trouvent par exemple, les variations géométriques des lamelles, des formes de plaques, des ondulations, des schémas hydrauliques du caloporteur, des résistances, la consommation d'énergie auxiliaire, l'amortissement, etc.
- indications sur la protection contre la corrosion et la durée de vie espérée, en précisant de quelle manière celles-ci influencent la puissance, et les frais d'acquisition.

- indications sur l'énergie utilisée et les coûts sur l'environnement lors de la fabrication et l'élimination des différents composants.

La figure 4.5 montre la relation de l'énergie nette récupérée en fonction du rendement pour deux températures limites différentes. Dans l'installation A, la chaleur n'est utilisée que jusqu'à une température de 12° C, car on mélange à l'air extérieur traité, par exemple, de l'air de roulement. Ceci signifie que l'installation de RC ne fonctionne que pour une température extérieure inférieure à environ 11° C. Le rendement optimal est de $f = 60\%$. Pour l'installation B par contre, la chaleur peut être utilisée jusqu'à une température de 20° C. Cela donne un rendement optimal de $f = 82\%$, dont la limite est due au fait que l'air rejeté ne peut pas être refroidi plus, à cause du risque de gel.

Une installation de RC ne devrait donc jamais être définie qu'avec une puissance ou un rendement pour un seul point de fonctionnement, mais par l'énergie nette récupérée annuellement. Il faut y prendre garde lors de l'élaboration du cahier de soumission (voir [4.21]).

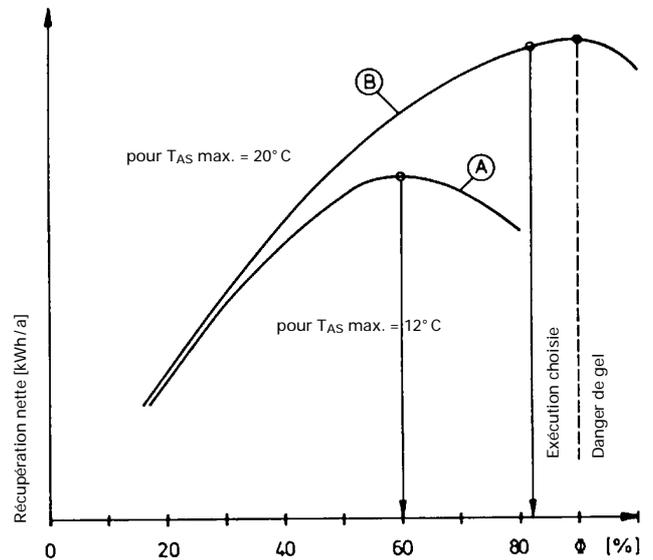


Figure 4.5: Optimisation de l'exécution en fonction du domaine d'application [4.8].

Résumé

- La ventilation de logements se fait traditionnellement en Suisse par l'ouverture plus ou moins censée des fenêtres et par les inétanchéités de la construction. Il n'est pas possible de récupérer de la chaleur de cette façon.
- Dans les pays à longue période de chauffage, la ventilation de base se fait en général par de simples installations mécaniques avec RC.
- Lorsqu'on examine l'utilisation de ventilation mécanique des logements (bruit, pollution, sécurité, besoin total en énergie réduit), il faut tenir compte de l'énergie électrique d'appoint nécessaire et de sa valeur énergétique (voir encart à la fin du chapitre).
- Du point de vue strictement économique, une ventilation mécanique de logement à double flux avec RC fait partie des investissements peu rentables au prix actuel de l'énergie. Toutefois, elle aide à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments si le dimensionnement est adéquat et permet de maintenir la salubrité de locaux habités par des personnes qui n'ouvrent pas ou trop peu les fenêtres (par exemple moisissures sur les parois).

4.4 Ventilation de logements

Supprimer les ponts de froid et les isolations insuffisantes réduit non seulement la consommation d'énergie et la pollution de l'environnement, mais augmente aussi le confort, à savoir :

- Des températures des surfaces intérieures plus élevées donnent une sensation de confort même avec une température ambiante plus basse.
- Si le corps de chauffe produit moins de chaleur, il provoque aussi moins de tourbillons d'air et de poussière.
- Une température ambiante plus basse, ainsi qu'une charge en particules de poussière réduite, font en sorte qu'une humidité ambiante moins élevée paraît encore confortable.
- Des températures de corps de chauffe plus basses permettent l'emploi de producteurs de chaleur ayant un niveau de température moins élevé, et donc l'utilisation de chaleur ambiante ou rejetée, à l'aide d'une pompe à chaleur.

Les fenêtres énergétiquement performantes, équipées de protections solaires ont les avantages suivants :

- Elles laissent entrer suffisamment de chaleur en hiver et évitent une trop grande insolation en été.
- De bonnes fenêtres étanches et à fort pouvoir isolant, permettent non seulement de diminuer la taille des corps de chauffe, mais aussi de changer leur répartition sur la façade et de ne plus en installer sous chaque fenêtre.

La façon dont l'air extérieur pénètre dans le bâtiment, puis ressort en emmenant les différentes émissions dépend de diverses conditions. Pour la ventilation de logement, il faut différencier suivant le type de maison et s'il s'agit de locataires ou de propriétaires.

Un autre paramètre, qu'il ne faut pas négliger, est l'occupation du logement, plus ou moins continue tout au long de la journée, ou avec de longues périodes d'absences pour raisons professionnelles.

L'architecte de maisons familiales peut souvent combiner l'approvisionnement en air frais hygié-

nique avec de l'énergie solaire passive, de sorte que cet air puisse être aspiré sous des éléments de façades réchauffés par le soleil. En général, les surfaces de «collecteurs» et la place pour faire passer l'air sont de dimensions suffisantes pour pouvoir se passer de ventilateur électrique. La hauteur de construction, ainsi que des liaisons internes sur plusieurs étages permettent de tirer profit des courants ascendants naturels.

Ces efforts lors de la conception des installations sont pourtant très utiles, car une maison de type familial est de toute façon énergétiquement moins favorable qu'une construction plus compacte. Des ventilateurs, de quelque type que se soit, ne devraient être employés que lorsque l'on peut garantir un bon facteur d'amplification thermique (voir encart en fin de chapitre).

Le système d'aération d'un immeuble à plusieurs appartements est en général mécanique, ceci pour des raisons de place et de taux d'occupation plus élevé. Le concepteur doit donc décider entre une solution centralisée ou décentralisée. Il va de soi, qu'ici aussi, il faut minimiser l'apport d'air frais. La prise d'air évacué doit se concentrer sur les locaux pour lesquels il est nécessaire de renouveler l'air fréquemment, c'est-à-dire la cuisine, la salle de bain et les WC.

Si on oublie l'investissement de planification et de surveillance de chantier supérieur, une solution centralisée de ventilation judicieusement conçue a des avantages notoires par rapport à une solution décentralisée :

- La prise d'air extérieur ainsi que celles de l'air extrait peuvent mieux être contrôlées du point de vue hygiénique.
- Les cycles saisonniers ainsi que jour/nuit peuvent être utilisés pour la RC (par exemple registre terrestre).
- Un grand système de RC est plus efficace que plusieurs petites unités.
- De grands ventilateurs et leur entraînement ont un rendement nettement supérieur à de petits ventilateurs.
- Les pertes de charge plus élevées du réseau de distribution offrent l'avantage d'être moins facilement perturbées par des éléments extérieurs tels que le vent ou des courants ascendants.

Le concept d'amplificateur électrothermique a été introduit et défini dans [4.4]. Il s'agit du rapport entre l'énergie thermique produite ou l'énergie fossile économisée et l'énergie électrique consommée. Ce facteur est aussi plus usuellement appelé « coefficient de performances (COP) ». Ce facteur d'amplification a les valeurs typiques suivantes :

<i>COP = ~ 3</i>	<i>PAC à moteur électrique</i>
<i>COP = ~ 7-25</i>	<i>Récupération de chaleur ou utilisation de rejets</i>
<i>COP = ~ 5-10</i>	<i>Installations modernes de renouvellement d'air en comparaison avec des installations conventionnelles</i>
<i>COP = ~ 7,5-15</i>	<i>Voitures électriques légères en comparaison avec des voitures conventionnelles à moteur à benzine.</i>

Le facteur d'amplification thermique moyen de systèmes rationnels ne devrait pas être inférieur à 3 pour tenir compte de la grande valeur de l'énergie électrique et des pertes survenant lors de sa transformation.

- Le filtrage de l'air est plus rationnel.
- Les dépenses et les produits d'une installation centralisée peuvent être plus facilement mesurés et interprétés.

Sur le plan économique/écologique, la ventilation mécanique d'habitations ne devrait pas coûter plus de Fr. 450. – par mégawatt-heure/an économisé (valeur expérimentale de la délégation à l'énergie du canton de Zurich, 1992).

Pour utiliser rationnellement l'énergie électrique, il est important de vérifier le facteur d'amplification électrothermique (aussi appelé coefficient de performance) du système choisi.

4.5 Nécessité du refroidissement de l'air ambiant

Résumé

- Les critères pour juger de la nécessité de refroidir l'air ambiant se trouvent sous chiffre 5.2 de la recommandation SIA V 382/3 [4.19]. D'autre part, il faut aussi observer les prescriptions des autorités.
- La condition préalable à toute preuve du besoin de refroidissement de l'air ambiant est l'observation d'exigences minimales en matière de construction. Il s'agit en particulier d'une protection extérieure efficace contre le soleil et d'une capacité suffisante d'accumulation de chaleur de la construction.
- Le refroidissement de l'air ambiant est accordé lorsqu'un des critères suivants est satisfait :
 - Cas spécial avec conditions particulières concernant le climat ambiant.
 - Charges internes élevées.
 - La température ambiante estivale maximale est trop élevée sans refroidissement (comparaison avec paragraphe 3.1.3.1).
 - Installation énergétiquement très performante, même avec refroidissement. Lorsqu'on applique les nouvelles technologies telles que refroidissement par rayonnement et utilisation de la masse du bâtiment comme volant thermique, le refroidissement n'augmente souvent pas la consommation totale d'énergie.
- La demande d'énergie pour un refroidissement mécanique peut être réduite, voire même éliminée, si on applique les techniques suivantes :
 - Aération nocturne (paragraphe 4.7).
 - Refroidissement de dalle en béton (paragraphe 4.8).
 - Plafond froid (paragraphe 4.9).
 - Registre terrestre à air (paragraphe 4.10).
 - Sonde géothermique (paragraphe 4.11).

4.6 Nécessité d'humidifier l'air ambiant

Résumé

- Les critères pour juger de la nécessité d'humidifier l'air ambiant se trouvent sous chiffre 5.3 de la recommandation SIA V 382/3 [4.19]. D'autre part, il faut aussi observer les prescriptions des autorités.
- L'humidification de l'air ambiant est accordée lorsqu'un des critères suivants est satisfait :
 - Cas spécial avec conditions particulières concernant le climat ambiant.
 - Humidité minimale de l'air ambiant trop basse sans humidification (voir aussi paragraphe 3.1.3.3).
- En général, il n'est pas nécessaire d'humidifier des bureaux ou des logements. L'impression que l'air est trop sec, et les réclamations qui en découlent, est souvent due à une température ambiante ou un apport d'air extérieur trop élevés, une trop grande densité de poussière dans l'air ou tout autre élément étranger.

Résumé

- En été, on peut activer l'accumulation de chaleur de la construction et du mobilier à l'aide d'une aération nocturne judicieuse. Par là, on peut abaisser de manière sensible la température ambiante maximale en été.
- Pour que l'aération nocturne soit efficace, la construction doit posséder une capacité d'accumulation suffisante et il faut atteindre un renouvellement d'air extérieur d'au moins 3 h^{-1} au moyen de l'ouverture des fenêtres ou à l'aide d'une installation de ventilation.
- Lorsqu'on décide d'installer une ventilation nocturne, il faut tenir compte, dans le cas d'une ventilation mécanique, de la consommation d'énergie pour le transport de l'air.

4.7 Aération nocturne

Par le passé, on a souvent installé, sans trop y penser, des équipements de ventilation avec refroidissement. Aujourd'hui, on essaie de remédier à l'inconfort dû à une température ambiante trop élevée autrement que par un refroidissement mécanique. L'une des solutions est l'aération nocturne.

Celui qui a la chance de pouvoir laisser ses fenêtres ouvertes lors des grandes chaleurs estivales, connaît le bienfait de la fraîcheur nocturne. La masse du bâtiment et le mobilier rendent à l'air nocturne la chaleur qu'ils ont accumulée durant la journée. Le lendemain, le processus peut recommencer avec une masse d'accumulation refroidie, sans que la température ambiante monte de façon excessive.

La figure 4.6 montre le déroulement journalier de la température de l'air extérieur par un jour chaud, avec un maximum de 30°C et une amplitude de $7,5 \text{K}$ [4.18]. La température extérieure maximale survient vers 16 heures, le minimum vers 4 heures (heure d'été).

Pour une aération nocturne efficace, les conditions suivantes doivent être remplies :

- L'air extérieur doit être plus frais d'au moins 2K que l'air ambiant. Selon la figure 4.6, ces conditions sont remplies en général entre 23 heures et le début du travail.
- La construction doit être au moins moyennement lourde, avec une masse spécifique d'accumulation de $m > 350 \text{kg/m}^2$ selon SIA V 382/2 chiffre 5.2. Le béton visible (nu) et les murs massifs sont particulièrement favorables, alors que des revêtements thermiques ou acoustiques sur la face interne sont défavorables.
- L'air nocturne frais doit s'écouler le plus directement possible le long des éléments accumulateurs. Pour une aération nocturne efficace, le renouvellement d'air doit être d'au moins 3 h^{-1} . Elle peut être réalisée soit au moyen d'une aération par les fenêtres (transversale) ou à l'aide d'une installation de ventilation. Dans le cas de l'aération par fenêtres, il faut prêter attention aux points suivants : sécurité, intempéries, bruit et pollution. En cas de ventilation mécanique, il faut tenir compte de la demande d'énergie pour le transport de l'air. Afin de la minimiser, les éléments de traitement de l'air devraient être bipassés. La seule utilisation du système d'évacuation de l'air peut aussi être suffisante. Ici aussi, le coefficient d'amplification électrothermique (paragraphe 4.4) doit être pris en compte.

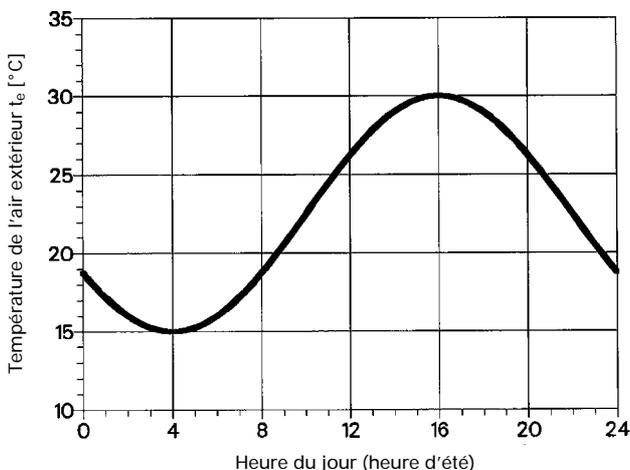


Figure 4.6 : Déroulement journalier de la température de l'air extérieur par un jour d'été chaud [4.18].

4.8 Refroidissement de dalle en béton

En comparaison avec l'aération nocturne décrite au paragraphe 4.7, le refroidissement de dalle en béton permet d'améliorer sensiblement la capacité d'accumulation de chaleur du béton.

L'évacuation de la chaleur accumulée durant la journée se fait à partir de conduites de refroidissement noyées dans le béton. Pour cela on utilise de l'eau, dont l'efficacité est bien meilleure qu'avec l'air et la capacité de transport plus grande. La chaleur accumulée par l'eau peut être évacuée dans l'air nocturne au moyen d'un aéro-refroidisseur. On peut souvent aussi utiliser le radier, car souvent la température du sous-sol suffit déjà à amener l'eau à la température désirée de 19° C. Dans ce cas, le coefficient d'amplification électrothermique sera encore plus favorable qu'avec un aérorefroidisseur.

La figure 4.7 montre une simulation dynamique à une dimension d'une dalle en béton refroidie d'une part en surface par l'air et, d'autre part par des conduites d'eau noyées dans la masse. Si l'on admet que l'air est à 17° C, et que l'eau, à cause des pertes dans l'échangeur de chaleur, est à 19° C, la supériorité du refroidissement de la dalle par conduites noyées, par rapport à un refroidissement nocturne conventionnel, devient claire.

Résumé

- Comparée à l'aération nocturne, on peut encore mieux activer la capacité d'accumulation de chaleur si on refroidit la dalle par des conduites d'eau enrobées dans le noyau de béton (béton contre local nu). Cette solution a deux avantages décisifs :
 - Le transport de la chaleur se fait au moyen d'eau bien plus efficace que l'air.
 - On évacue la chaleur d'accumulation la nuit, lorsque l'air frais est à disposition pour le free - cooling.
- Contrairement au plafond froid à rayonnement direct, disposé sous la dalle (paragraphe 4.9), le refroidissement de dalle en béton rend impossible tout comportement négligent de l'exploitant, puisqu'il n'y a pas de machine frigorifique pour éliminer les charges.

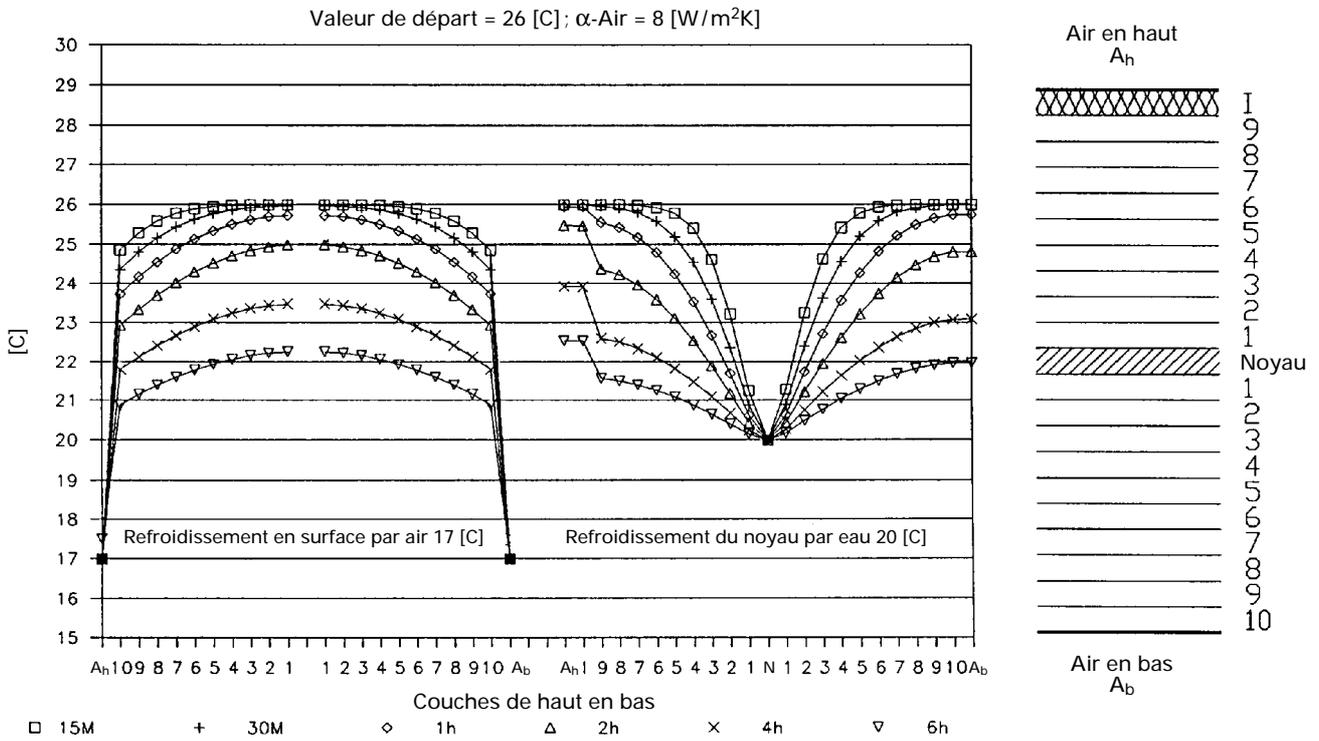


Figure 4.7:
 Comparaison du refroidissement d'une dalle en béton par air en surface et par des conduites d'eau noyées dans la masse, pour différents pas de temps [4.11] (M = minutes, h = heures).

4.9 Plafonds froids

La ventilation par faux-plafond perforé est passé de mode il y a dix ou quinze ans, surtout pour des raisons hygiéniques. Elle a été remplacée par des systèmes qui amenaient l'air par des canaux ou des conduites jusqu'aux bouches d'insufflation. Personne ne s'est rendu compte qu'en même temps, on perdait une surface de refroidissement efficace. En effet, l'air pulsé à 16° C dans le vide du faux-plafond abaissait la température de ce dernier pour en faire, en quelque sorte, un plafond froid.

Après avoir oublié ces « plafonds froids » durant quelques années, ils furent redécouverts sous une autre forme. A la place du refroidissement par air, on a installé un refroidissement par eau, nettement plus efficace pour des charges élevées.

Il est clair qu'il est plus efficace d'évacuer la chaleur par un plafond froid à eau, que par un simple système à air.

On ne prête souvent pas attention au fait que ces plafonds froids, commodes et efficaces, incitent à des exigences plus élevées en matière de confort et à une utilisation moins réfléchie du froid. Par exemple tarder à baisser un store n'amène plus immédiatement un sentiment d'inconfort !

Il faut relever que les plafonds rayonnants mettent la production de froid à contribution juste au moment où il fait le plus chaud et où la consommation d'électricité est la plus élevée.

Pour répondre à des cas difficiles de refroidissement, le système moderne de plafonds froids est le bienvenu. Toutefois, il faut s'assurer que le dimensionnement répond bien aux exigences et ne pas oublier que la couche de béton située juste au-dessus peut jouer sans entraves son rôle de volant thermique.

Résumé

- Le plafond froid est formé d'éléments creux, disposés sous la dalle et traversés soit par de l'eau, soit par de l'air. C'est un moyen doux mais efficace pour refroidir un local.
- Lors du dimensionnement, il faut prendre garde à éviter toute formation d'eau de condensation.
- La commodité et la grande capacité des plafonds froids incitent l'utilisateur à de plus grandes exigences en matière de confort et partant, à un gaspillage de froid. Pour éviter une consommation d'énergie inutile, il faut limiter la puissance de refroidissement à la quantité réellement nécessaire.

Résumé

- Dans un registre terrestre à air, on aspire l'air extérieur au travers d'un système de conduites enterrées, pour réchauffer l'air extérieur en hiver et le refroidir en été.
- Le potentiel énergétique est très élevé, car les dépenses complémentaires en énergie d'appoint (électricité) sont réduites.
- Pour éviter toute baisse de qualité du niveau hygiénique de l'air frais, il faut éviter toute poche de condensation, et garantir les possibilités de contrôle et de nettoyage du registre.

4.10 Registre terrestre à air

Dans une installation de renouvellement d'air avec registre terrestre, l'air extérieur est aspiré au travers de conduites enterrées, par exemple sous le radier. Par ce moyen, on réchauffe l'air extérieur en hiver et on le refroidit en été. La température du sol autour des conduites, et par là le rendement du registre, est fortement influencée par la nature du sol (teneur en eau) et par la température du local situé directement au-dessus (caves ou garages non chauffés). Le registre terrestre à air est bien indiqué pour gommer les brèves pointes de charge estivales ou hivernales.

La figure 4.8 montre l'exemple d'un registre terrestre à air dans sa phase de construction ; ce sont 43 tuyaux posés dans la nappe phréatique. Chaque tuyau en matière synthétique a une longueur de 23 m et un diamètre intérieur de 23 cm. Ils sont disposés à 1,15 m les uns des autres, perpendiculairement au bâtiment et à 0,80 m sous la dalle, avec de la pente.

Avec cette installation, on a atteint les rendements suivants (valeurs mesurées) :

- Été (température extérieure = 32° C) :
température de sortie de l'air = 22° C
puissance de froid = 55 kW (17 150 m³/h)
- Hiver (température extérieure = -11° C) :
température de sortie de l'air = 6° C
puissance de chauffe = 65 kW (12 000 m³/h)

Le registre terrestre à air est rentable, en combinaison avec une ventilation nocturne, si on peut renoncer à une installation frigorifique mécanique. On peut alors construire des bâtiments économes en énergie, qui offrent pourtant un haut niveau de confort, comme par exemple :

- bâtiments de bureaux ;
- constructions industrielles ou commerciales ;
- écoles ;
- maisons familiales ou immeubles à usage locatif.

Le registre terrestre à air fonctionne en hiver et en été. A l'entre-saison, lorsque la température de l'air extérieur se situe entre 6 et 21° C, le registre terrestre à air n'est pas en fonction, car la récupération de chaleur suffit à garantir la température

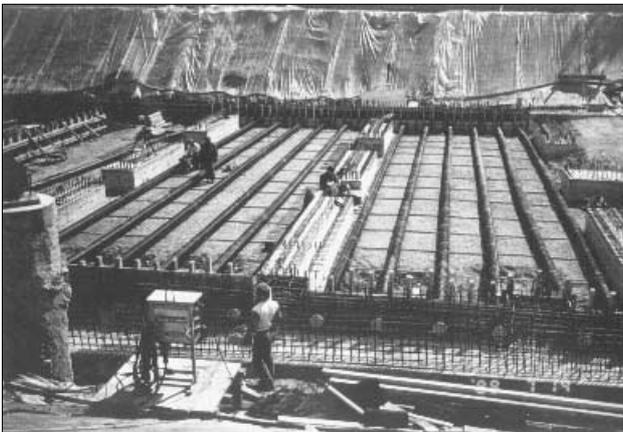


Figure 4.8 :
Exemple d'un registre terrestre à air lors de sa phase de construction.

de l'air pulsé. En été, il n'est mis en service que lorsque la température de l'air ambiant dépasse une certaine limite (par exemple 24° C).

En hiver, la régulation de la température de l'air pulsé se fait en cascade avec tout d'abord la récupération de chaleur, puis le registre terrestre à air (régulation progressive des clapets), et enfin le cas échéant la batterie de post chauffage. Si des températures de l'air pulsé $\leq 16^{\circ}\text{C}$ sont suffisantes, on peut renoncer à la batterie de post chauffage, pour autant que le dimensionnement du registre terrestre à air soit correct.

A l'aide du registre terrestre à air, on peut maintenir la température de l'air pulsé toujours en dessous de la température de l'air ambiant (condition pour une ventilation par déplacement d'air).

Les quelques indications de dimensionnement suivantes devraient être observées lors du prédimensionnement et pour une première estimation des coûts.

- Vitesse d'air maximale :
<4 m/s
- Canalisations :
tuyau ciment (sol sec)
tuyau PE Haute Pression (sol mouillé)
- Longueur minimale des tuyaux :
sol sec >30 m
sol mouillé >20 m
- Diamètre optimal des tuyaux :
sol sec ≥ 30 cm
sol mouillé <25 cm
- Ecartement latéral des tuyaux :
minimum 1 m
optimal >2 m
- Distance au radier :
aussi grande que possible (minimum 0,6 m)

Il faut encore tenir compte des remarques suivantes :

- Les tuyaux et les collecteurs doivent être posés avec pente, afin de pouvoir évacuer toute eau de condensation.
- Les collecteurs doivent être visitables afin de pouvoir contrôler visuellement les tuyaux et leurs raccordements.
- Dans un sol mouillé, les raccords des tuyaux aux collecteurs doivent être réalisés au moyen de 2 manchettes d'étanchéité posées à l'extérieur.

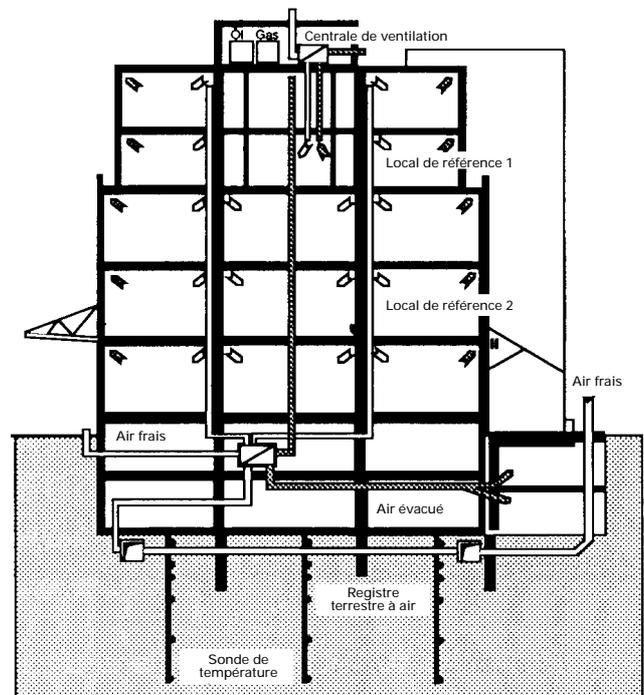


Figure 4.9 :
Cheminement de l'air dans un bâtiment administratif disposant d'un registre terrestre à air.

Les registres terrestres à air montrent un facteur d'amplification électrothermique optimal (définition voir paragraphe 4.4). En comparaison avec des systèmes conventionnels, les registres terrestres à air atteignent, en hiver et en été, un facteur d'amplification électrothermique de 60-80 (coefficient de performance de pompes à chaleur <4 et de machines frigorifiques <3).

Dans le cadre de projet de recherches, il est prévu de mettre à la disposition des planificateurs un programme PC pour le dimensionnement de registres terrestres à air pour sol sec et humide. Ce programme permettra de calculer heure par heure la puissance du registre terrestre à air en tenant compte des conditions cadres principales (système de ventilation, sol, bâtiment).

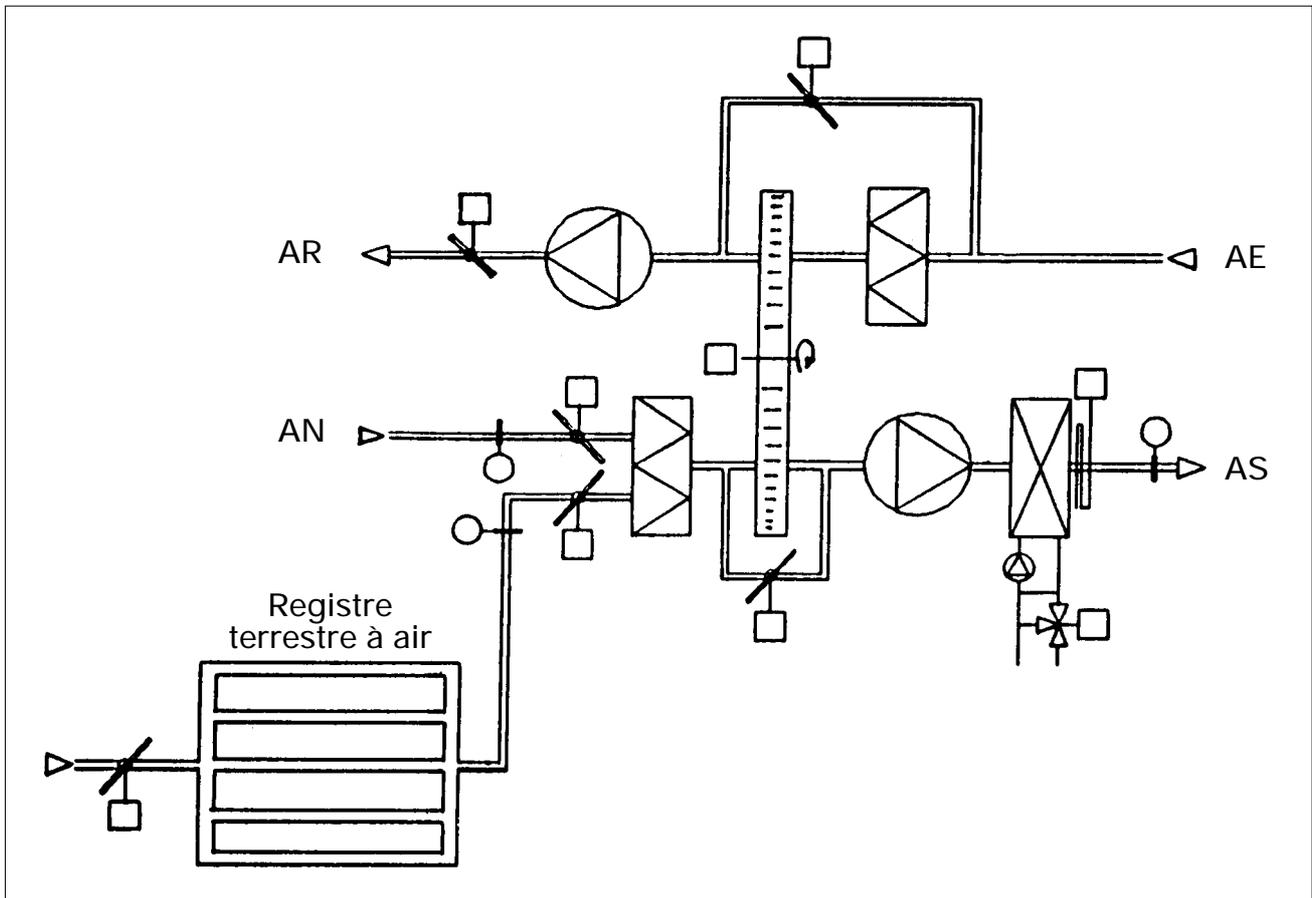


Figure 4.10: Schéma de principe d'une installation de renouvellement d'air avec registre terrestre à air.

4.11 Sondes géothermiques

4.11.1 Chauffage en hiver

Pour l'exploitation de la chaleur terrestre dans des profondeurs allant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres («géothermie à faible profondeur»), on emploie des sondes géothermiques verticales. Dans ce domaine, l'énergie utilisable est présente normalement sous forme de chaleur de moins de 20° C. Une sonde géothermique est formée pour l'essentiel d'un circuit d'eau fermé, le circuit primaire. Les tuyaux nécessaires sont amenés en profondeur par une série de forages, généralement verticaux. Le fluide caloporteur, de l'eau avec environ 25 % vol. d'antigel, est pompé à travers le système pour en retirer de la chaleur. Le mélange d'eau glycolée rend ensuite, en passant par un échangeur, la chaleur extraite du sol à une pompe à chaleur. Il n'y a aucun contact direct entre l'agent frigorigène dans la PAC et le fluide caloporteur de la sonde. L'énergie retirée de cette façon du circuit primaire est alors amené par la PAC à la température nécessaire pour le chauffage. Par ce système, on peut atteindre des coefficients de performances moyens, de plus de 3 [4.3, 4.15].

Données critiques de dimensionnement

La répartition des températures du sol varie non seulement durant la journée, mais aussi à plus longue durée; c'est-à-dire que la source d'énergie varie et rend en cela le dimensionnement optimal d'une installation à sonde géothermique difficile. Il faut donc tenir compte des données suivantes lors de la planification d'une telle installation :

- La demande d'énergie de la maison. Elle est déterminée par la taille et la nature de la construction, son orientation, ainsi que sa situation climatique.
- La température la plus haute exigée par le circuit de chauffage. Elle est influencée par le choix du système (par exemple chauffage à basse température) et son dimensionnement.
- L'économie d'énergie visée. Moins on désire consommer d'énergie auxiliaire, plus les investissements sont élevés.
- La température du circuit primaire. En gros, elle est déterminée par la géométrie de la sonde, le débit du circuit, ainsi que par la

Résumé

- Les sondes géothermiques sont des sondes verticales par lesquelles on peut exploiter la température plus ou moins constante du sol à des profondeurs allant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres.
- De cette façon, on peut tirer de la chaleur du sol en hiver, et lui en redonner en été. Pour atteindre les températures nécessaires, il faut une pompe à chaleur en hiver. En été, le mélange eau/glycol qui circule dans les sondes géothermiques peut être directement utilisé pour le refroidissement, à l'aide d'un échangeur de chaleur.
- Lorsqu'on examine l'opportunité d'une installation de sondes géothermiques, il faut tenir compte de la demande en énergie électrique pour le transport des fluides.

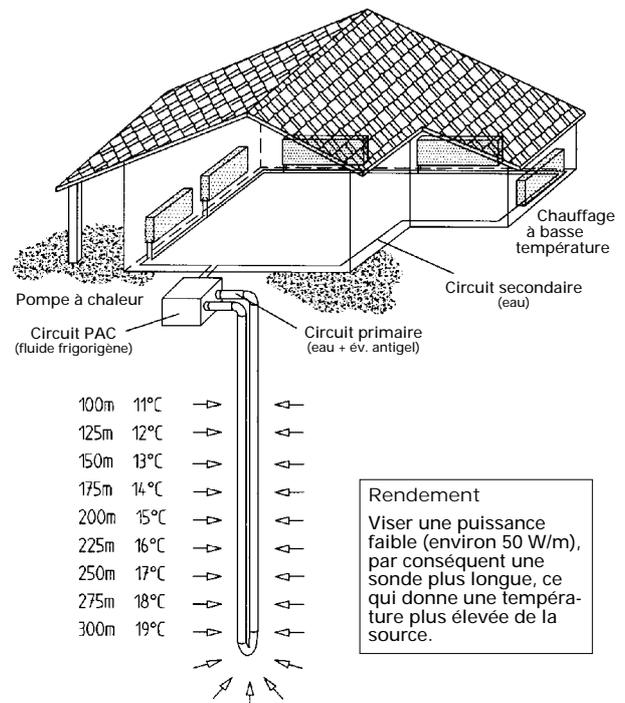


Figure 4.11 : Esquisse de principe d'une installation à sonde géothermique.

nature du sol. Valeur indicative : pour un temps de fonctionnement de la PAC de 2000 h/a environ, il faut calculer environ 20 m de longueur de sonde par kW de puissance thermique désirée (50 W/m).

Puissance de chauffage de la pompe à chaleur

Il ne faut pas calculer la puissance de chauffage de la PAC de façon trop juste. Un dimensionnement trop serré a pour conséquence une longue durée de fonctionnement, et donc une surcharge de la sonde géothermique. Si le temps de « rétablissement » (flux de chaleur) manque, la température utile de la source de chaleur chute et donc la puissance de chauffage aussi. La rentabilité diminue et les températures ambiantes ne peuvent plus être atteintes.

Pour mémoire, il est utile de rappeler que plus l'écart entre la température d'évaporation et celle de condensation augmente, plus le coefficient de performance chute.

4.11.2 Refroidissement en été

Les sondes géothermiques, qui sont utilisées en hiver comme source de chaleur pour les PAC, peuvent aussi servir en été à refroidir l'air extérieur. Il n'existe pas de données sûres sur les performances auxquelles on peut s'attendre, car aucune mesure systématique n'ont été faites jusqu'à présent. On estime que pour environ 1000 heures de fonctionnement en été, on atteint une puissance de froid d'environ 50% de la puissance de chauffe de l'hiver, c'est-à-dire environ 25 W/m.

En retirant de la chaleur en hiver pour le chauffage et en apportant de la chaleur en été pour le refroidissement, on améliore le rendement de la pompe à chaleur.

La puissance absorbée pour l'entraînement des pompes de circulation et des ventilateurs (résistance plus élevée des refroidisseurs car la surface d'échange est plus grande et la température de l'eau de refroidissement plus élevée) est augmentée de 10-15% par rapport à une installation frigorifique traditionnelle.

4.12 Commande et régulation en fonction des besoins

La façon la plus simple d'adapter le fonctionnement de l'installation de ventilation aux besoins est encore la mise en- et hors-service. Cela peut se faire de la manière suivante :

- Interrupteur manuel
A actionner lorsqu'on entre ou on sort d'un local, ou lors de l'aération par les fenêtres. Son efficacité varie en fonction de la discipline des utilisateurs.
- Horloge
Elle rend de grands services pour peu d'efforts, pourvu qu'elle soit réglée pour des périodes de jour et de semaine bien définies.
- Contact d'ouverture de fenêtre
Si on ouvre la fenêtre alors que l'installation de ventilation fonctionne, de l'énergie est gaspillée. Un contact d'ouverture de fenêtre permet l'arrêt automatique de l'installation si l'on ouvre une fenêtre.
- Détecteur de mouvement
Un détecteur de mouvement (détecteur infrarouge) peut révéler la présence de personnes dans un local. Ce moyen est assez sûr pour pouvoir servir de commande à une installation de ventilation.

Si l'utilisation est variable, on peut régler la quantité d'air sur la base d'un détecteur de polluants, de façon que certaines valeurs limites soient respectées. Comme détecteur de polluants, on peut employer :

- Détecteur de CO₂
Des détecteurs de CO₂ sont adaptés à des locaux où on ne fume pas (valeur limite éprouvée = 800 ppm CO₂ + balayage du local avant l'utilisation).
- Détecteur de mélange de gaz
De tels détecteurs sont indiqués pour des locaux où on peut fumer.

Résumé

- Il faut tout d'abord s'assurer, par des mesures appropriées, que les installations de ventilation et de climatisation ne sont en service que lorsque c'est nécessaire.
- Lors du fonctionnement des installations, il faut veiller à ce qu'elles travaillent en fonction des besoins et avec le minimum d'énergie nécessaire.
- Les mesures les plus simples, comme interrupteur manuel et horloge, sont souvent aussi les plus efficaces. Si l'installation a été dimensionnée au plus juste des solutions coûteuses à débit variable ont moins d'importance qu'on ne leur prêtait il y a encore quelques années.

Résumé

- Des installations VAV sont indiquées pour des locaux à utilisations très variées, afin d'obtenir un fonctionnement adapté aux besoins. Si le dimensionnement de l'installation est adéquat, une installation VAV ne se justifie alors que dans ces cas particuliers.
- Dans une installation VAV, il faut dimensionner tous les composants en fonction du débit variable. Des régulations VAV mécaniques doivent être évitées en raison de leurs grosses pertes de charge.

4.13 Installations à débit variable (VAV)

A l'époque où on utilisait l'air pulsé à température constante pour satisfaire à toutes les demandes de rafraîchissement, on était obligé de varier le débit d'air pour régler la puissance.

La construction d'une installation VAV est judicieuse pour permettre un fonctionnement selon les besoins lors d'utilisations très variées. Si le dimensionnement de l'installation est adéquat, une installation VAV ne se justifie plus que pour ces cas particuliers.

On exige d'une installation VAV qu'à tout moment elle puisse livrer individuellement à chaque local le débit d'air nécessaire. Pour cela, il faut dimensionner tous les composants en fonction du débit d'air variable.

Régulateur de débit d'air

Les régulateurs de débit d'air doivent garantir que chaque local reçoive le débit nécessaire, indépendamment de la pression qui règne momentanément dans le réseau de distribution.

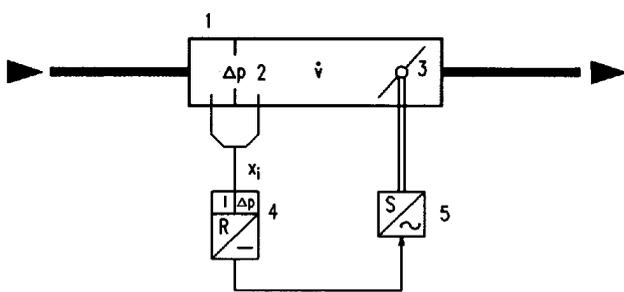
La figure 4.12 montre le principe d'un régulateur de débit d'air avec mesure du débit (p. ex. au moyen d'un diaphragme). La figure 4.13 montre le principe d'un régulateur de débit d'air mécanique, avec réglage directement à l'aide de la pression du canal.

Lors du choix du régulateur, il faut noter que la pression primaire minimale nécessaire à la régulation doit rester aussi basse que possible. Comme celle-ci est nettement plus élevée pour un régulateur VAV mécanique que pour un régulateur VAV à dispositif de mesure, il faut éviter les régulateurs mécaniques pour des raisons énergétiques.

Ventilateur

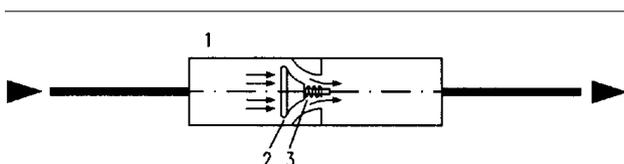
Le ventilateur doit aussi pouvoir s'adapter aux besoins.

Dans tout le réseau de canaux, la pression doit être suffisante pour que les régulateurs de débit puissent fonctionner. Il est possible que plusieurs points de mesure soient nécessaires.



- 1 Régulateur de débit
- 2 Mesure (diaphragme, croix)
- 3 Clapet
- 4 Régulateur
- 5 Servo-moteur

Figure 4.12: Régulateur VAV avec dispositif de mesure (Δp_{min} = environ 20 Pa).



- 1 Régulateur de débit
- 2 Cône de réglage
- 3 Ressort

Figure 4.13: Régulateur VAV mécanique (Δp_{min} = environ 80 Pa au volume d'air minimum).

Bouches de pulsion

Lors du choix de la bouche de pulsion et de son dimensionnement, il faut veiller à ce qu'elle soit adaptée aux différents débits d'air (100%-30%), afin que le balayage du local soit encore suffisant en charge partielle.

Les bouches à forte induction et les ventilations à déplacement d'air remplissent ces conditions sans aide mécanique particulière.

Bibliographie chapitre 4

- [4.1] Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen AWP
Technische Dokumentation der TK über Wärmepumpenheizungsanlagen
AWP Zürich, Oktober 1991
- [4.2] E. Beck
Über das Einfrieren von Plattenwärmetauschern
HLH Band 43 (1992) Nr.7, Seiten 370-374
- [4.3] Office fédéral de l'énergie OFEN
Erdwärmesonden-Heizanlagen
Studie Nr.46, September 1989
- [4.4] Office fédéral des questions conjonctuelles
RAVEL domaine chaleur - cahier 1
Elektrizität und Wärme
Bestell-Nr.724.357-d
- [4.5] Office fédéral des questions conjonctuelles
RAVEL domaine chaleur - cahier 2
Wärmerückgewinnung end Abwärmennutzung
Bestell-Nr.724.355-d
- [4.6] Office fédéral des questions conjonctuelles
RAVEL domaine chaleur - cahier 3
Wärmepumpen
Bestell-Nr.724.356-d
- [4.7] Office fédéral des questions conjonctuelles
RAVEL domaine chaleur - cahier 4
Wärme­kraftkopplung
Bestell-Nr.724.358-d
- [4.8] Office fédéral des questions conjonctuelles
Programme d'impulsion installations du bâtiment 1987
Wärmerückgewinnung in Lüftungs- und Klimaanlageanlagen
Form.724.709d 12.87 1000 41945
- [4.9] F. Haberda, V. Meyringer, L. Trepte
Bestandsaufnahme zur Ausführung von Lüftungsanlagen im Wohnungsbau
Bundesministerium für Forschung und Technologie BMFT-FB-T 86-230
- [4.10] Hans Martin Mathisen
Analysis and Evaluation of Displacement Ventilation
Dissertation NTH Trondheim
VVS-rapport 1989:2

- [4.11] R. Meierhans, D. Brühwiler
Intensive Nutzung der Gebäudespeichermasse zur Nächtlichen Kühlung
7. Schweizerisches Statusseminar 1992
Energieforschung im Hochbau
- [4.12] V. Meyringer
Voraussetzungen für den energiewirtschaftlich sinnvollen Einsatz von Lüftungsanlagen in Wohnungsbau
Bundesministerium für Forschung und Technologie BMFT-FB-T 86-240
- [4.13] Recknagel, Sprenger, Hönmann
Manuel pratique du génie climatique
Pyc Edition Paris, édition 1986. ISBN 2-85330-084-6
- [4.14] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Meteocaten für die Haustechnik
Dokumentation D 012, Januar 1987
- [4.15] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA et Office fédéral de l'énergie OFEN
Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température
Documentation D 025, Mai 1988
- [4.16] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs mécaniciens et électriciens, ainsi que des ingénieurs spécialisés dans les installations du bâtiment
Règlement SIA 108, édition 1984
- [4.17] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Performances techniques requises pour les installations de ventilation et de climatisation.
Recommandation SIA V382/1, édition 1992
- [4.18] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Puissance de réfrigération à installer dans le bâtiment
Recommandation SIA V382/2, édition 1992
- [4.19] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA
Preuve des besoins pour les installations de ventilation et de climatisation
Recommandation SIA V382/3, édition 1992
- [4.20] Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation SICC
Procès-verbaux de réception
Directives 88-1 F, SICC
- [4.21] Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation SICC
Systèmes de récupération de chaleur
Directives 89-1 F, SICC
- [4.22] Urs Steinemann
Arbeitsbericht zur Definition energetisch guter Lüftungstechnischer Anlagen
Bericht US 92-14-01 vom Dezember 1992 im Auftrag des SIA und des BEW
- [4.23] TÜV Rheinland
Lüftung im Wohnungsbau
Bericht Statusseminar, ISBN 3-88585-172-5
- [4.24] Carl-Georg Ungerland
Die Lüftung als notwendige Voraussetzung für ein gesundes Wohnklima
Buchenweg 7, D-8200 Rosenheim
- [4.25] H. Werner, W. Fies
Fortschrittliche Systeme für die Wohnungslüftung, Teil B
IPB-Bericht EB-21, 1989
Fraunhoferinstitut für Bauphysik, Stuttgart

5. Ventilateurs

5.1	Types de ventilateurs	88
5.1.1	Standardisation	88
5.1.2	Pression, débit et rendement	90
5.1.3	Bruit	93

5.2	Courbes caractéristiques	94
5.2.1	Ventilateurs radiaux	94
5.2.2	Ventilateurs axiaux	97
5.2.3	Ventilateurs tangentiels	100

5.3	Règles de similitude	101
5.3.1	Influence du poids spécifique de l'air	101
5.3.2	Lois de proportionnalité	103
5.3.3	Lois d'affinité	103

5.4	Courbe caractéristique du réseau et point de fonctionnement	104
-----	---	-----

5.5	Régulation du débit	105
-----	---------------------	-----

5.6	Pertes lors du montage	112
-----	------------------------	-----

	Bibliographie chapitre 5	112
--	--------------------------	-----

5. Ventilateurs

Un ventilateur est une machine qui transforme de l'énergie électrique en débit d'air et pression. Il est souhaitable que cette transformation se fasse avec le moins de pertes possibles et aussi silencieusement que possible. Jusqu'à environ 25 kPa on parle de ventilateur, au-delà de soufflante.

La consommation d'énergie électrique occasionnée par le transport de l'air est actuellement au centre des efforts d'économie, depuis que les besoins en énergie pour le chauffage ou la réfrigération ont pu être beaucoup diminués, ces dernières années, grâce aux améliorations effectuées en matière de protection thermique aussi bien hivernale qu'estivale.

La consommation d'énergie pour le transport de l'air est actuellement souvent beaucoup trop élevée. Pour améliorer cette situation, il est nécessaire de choisir plus soigneusement les ventilateurs, d'adapter les systèmes d'entraînement et de les exploiter sur la plage de rendement optimale. Il est fréquent de trouver des rendements globaux de l'ordre de 25 %, lorsqu'on mesure des petits ventilateurs.

Il est essentiel, pour pouvoir réaliser une installation énergétiquement performante, d'avoir la possibilité de régler les débits en fonction des besoins, et ainsi les limiter au minimum. De plus, il faut réduire les pertes de charge au minimum économiquement admissible. Il faut encore noter que, pour bien choisir un ventilateur ou un moteur, il faut pouvoir s'appuyer sur des calculs de perte de charge fiables.



Figure 5.1 : Ventilateur « Casablanca » à rotation lente.

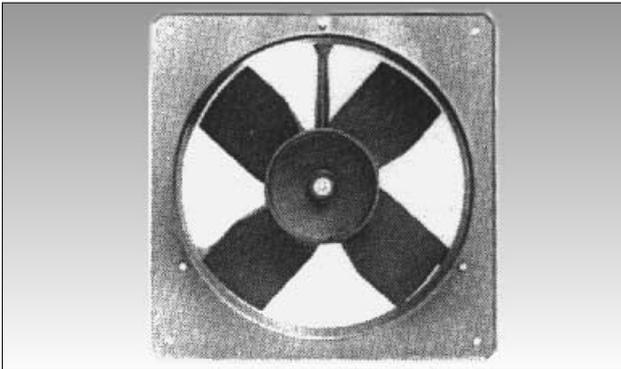


Figure 5.2 : Ventilateur hélicoïde de paroi.

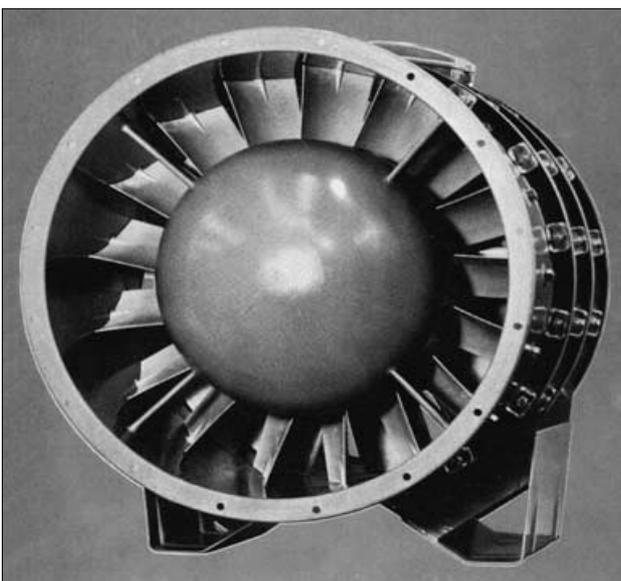


Figure 5.3 : Ventilateur axial à hautes performances avec distributeur (amont) et angle de calage de pale réglable à l'arrêt.

5.1 Types de ventilateurs

5.1.1 Standardisation

Bien que les différents types de construction de ventilateurs se recoupent, on fait une première distinction entre les ventilateurs axiaux et les ventilateurs radiaux.

Ventilateurs axiaux

Ce type de construction s'étend depuis le ventilateur plafonnier « Casablanca » à rotation lente jusqu'au ventilateur hélicoïde à enveloppe en passant par le ventilateur hélicoïde de paroi.

Ventilateurs radiaux

Ce type de construction s'étend du ventilateur à aubes recourbées vers l'avant, de construction relativement légère, jusqu'au ventilateur radial à haute pression, en passant par le ventilateur à haut rendement à aubes recourbées vers l'arrière, muni d'un aubage de prérotation.

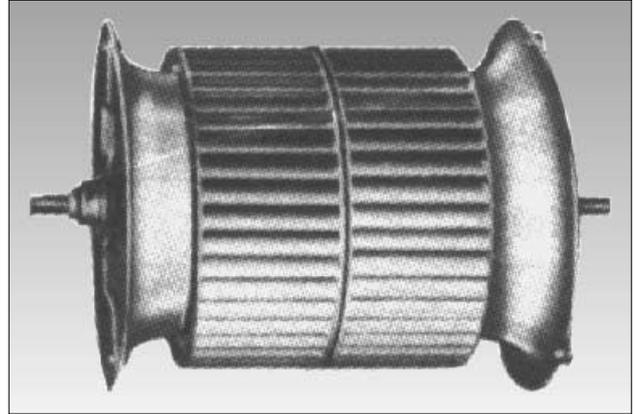


Figure 5.4 : Ventilateur radial à aubes recourbées vers l'avant.

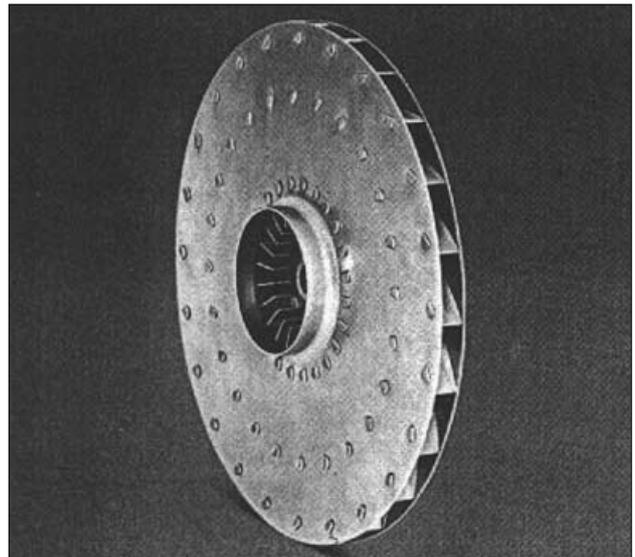


Figure 5.5 : Ventilateur radial à haute pression.

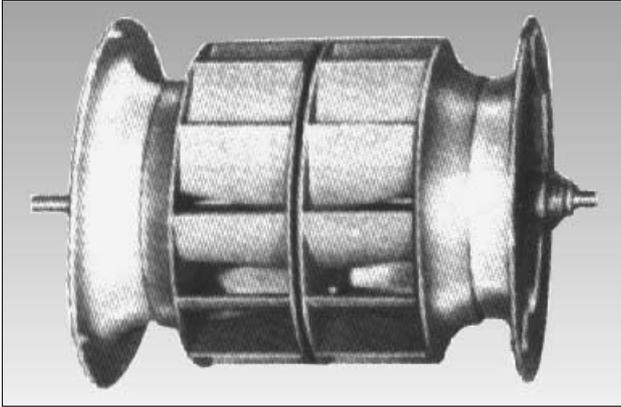


Figure 5.6:
Ventilateur radial à aubes recourbées vers l'arrière
(aubes profilées ou non profilées).

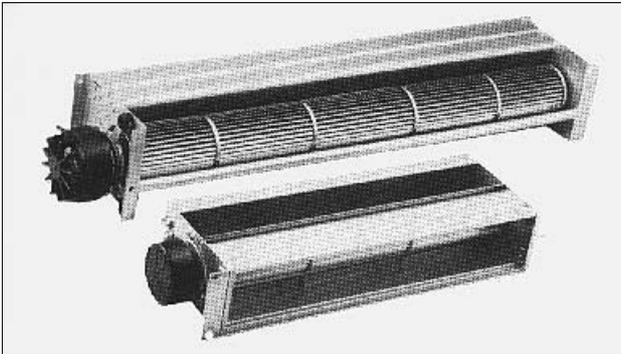


Figure 5.7:
Ventilateur tangential.

Une autre variante du ventilateur radial est le ventilateur tangential. Il est essentiellement employé dans les climatiseurs et les ventilo-convecteurs.

5.1.2 Pression, débit et rendement

Le ventilateur radial à aubes recourbées vers l'arrière (profilées ou non profilées) se distingue des autres types de ventilateurs radiaux, par son rendement nettement meilleur et sa courbe caractéristique plus raide. De plus, il peut couvrir un domaine de pression bien plus étendu. Par contre, le ventilateur à aubes recourbées vers l'avant livre, à taille égale, presque deux fois le débit d'air d'un ventilateur à aubes recourbées vers l'arrière [5.3].

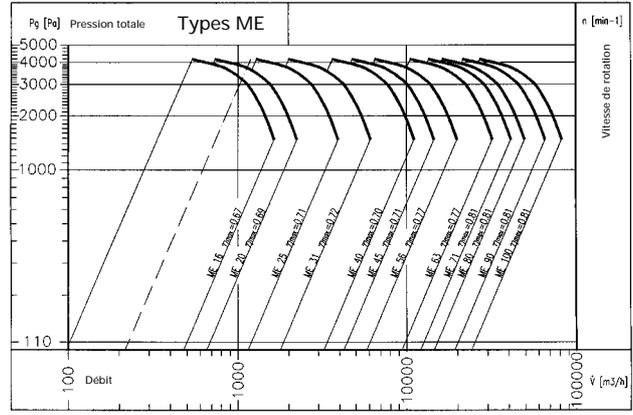
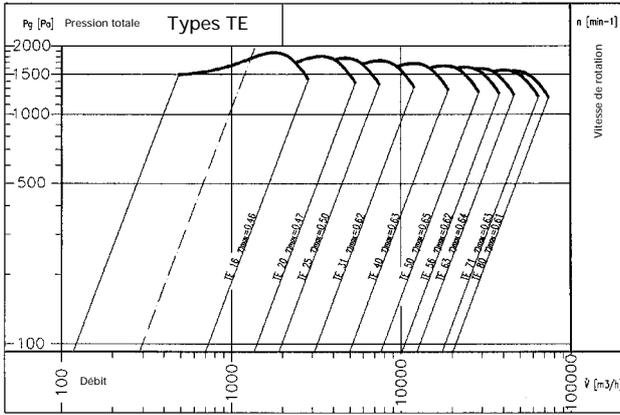


Figure 5.8: Domaine d'application et rendement maximum de ventilateurs à aubes recourbées vers l'avant (types-TE, à gauche) et de ventilateurs à aubes recourbées vers l'arrière (types-ME, à droite) [5.5].

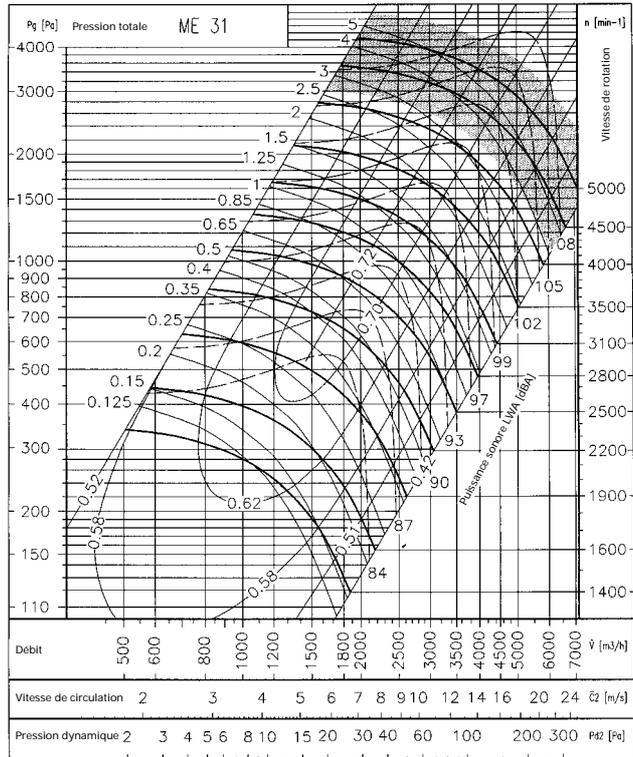
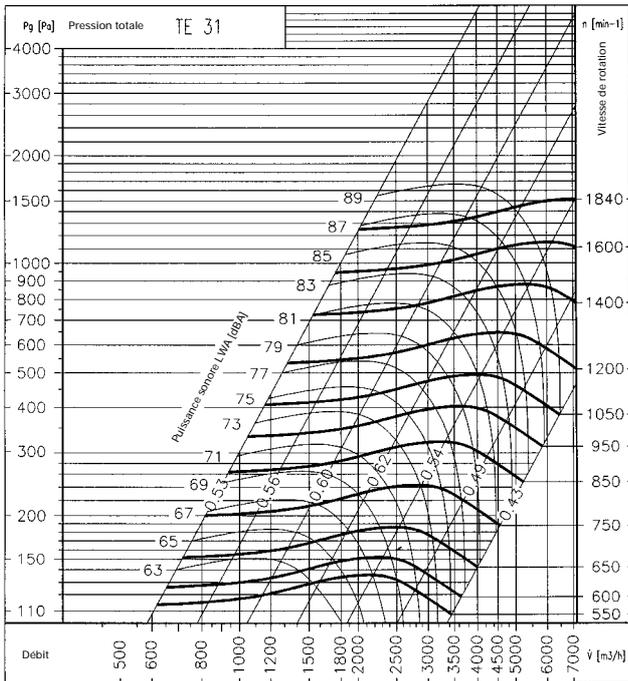


Figure 5.9: Champ de courbes caractéristiques d'un ventilateur à aubes recourbées vers l'avant (TE 31, à gauche) et d'un ventilateur à aubes recourbées vers l'arrière (ME 31, à droite) [5.5].

Le ventilateur axial a en général des courbes débit – pression encore plus raides que les ventilateurs radiaux à aubes recourbées vers l’arrière.

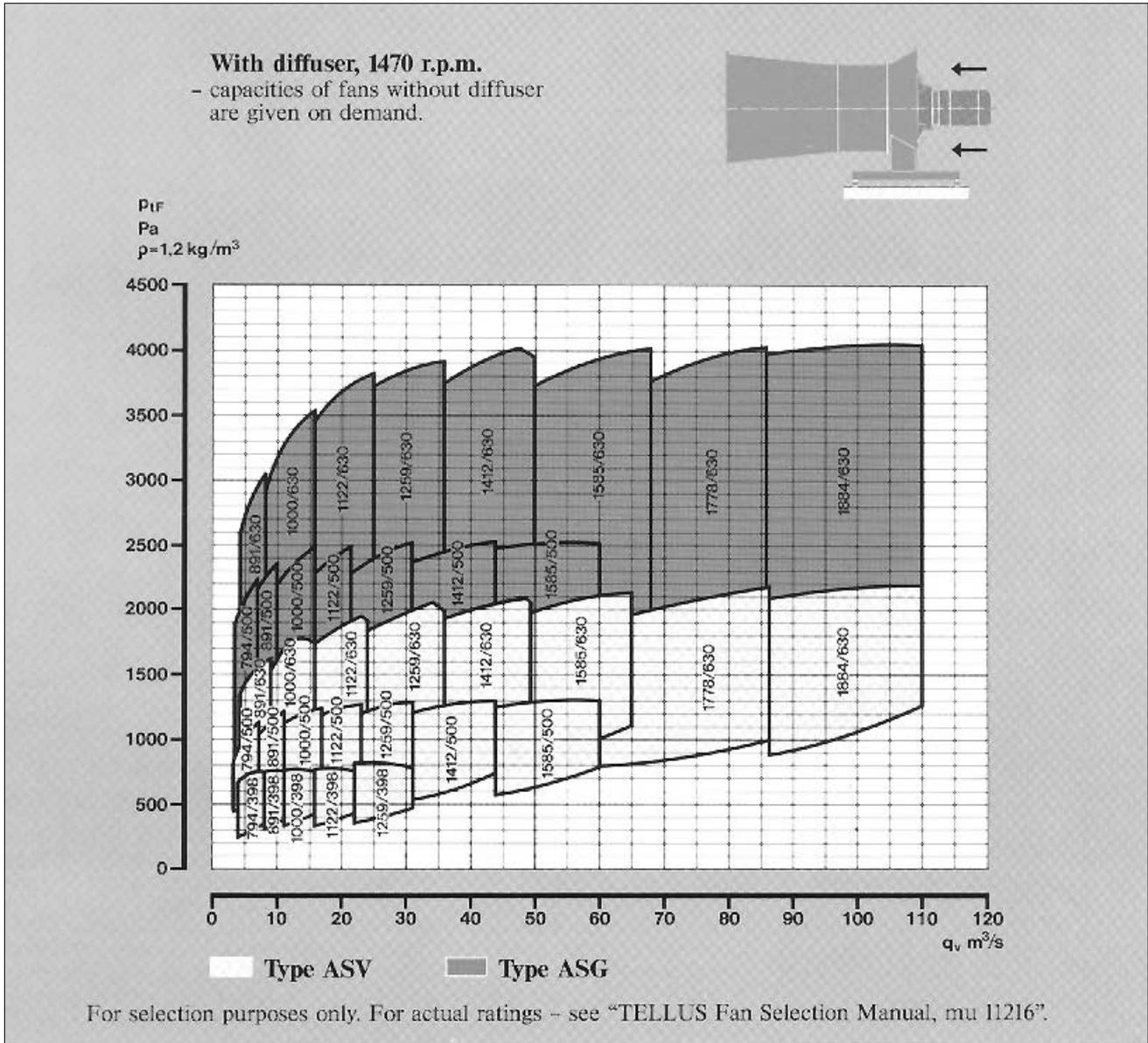


Figure 5.10:
 Domaine d'utilisation de ventilateurs axiaux [5.4].

5.1.3 Bruit

Lorsqu'on compare le bruit que produisent différents types de ventilateurs fonctionnant à leur meilleur rendement, on remarque qu'il n'est pas possible de mettre en évidence de différence systématique. On doit alors d'autant plus tenir compte des indications des fabricants, car des détails d'exécution ou des tolérances de construction peuvent créer des différences sensibles.

Dans les cas limites, il vaut la peine de prévoir une place de réserve pour pouvoir plus tard, si cela s'avère nécessaire, prolonger l'amortisseur de bruit. D'une façon générale, on admet que le bruit supplémentaire généré par le ventilateur, dû à l'augmentation de pression nécessaire pour vaincre les pertes de charge de l'amortisseur est environ dix fois plus faible que l'atténuation acoustique provoquée par l'amortisseur.

Résumé

- Des ventilateurs à aubes recourbées vers l'arrière bien choisis sont plus silencieux et plus économes en énergie que les ventilateurs à aubes recourbées vers l'avant, qui sont meilleur marché.
- Dans les applications usuelles de ventilation, les ventilateurs axiaux ont aussi souvent un rendement inférieur à celui des ventilateurs à aubes recourbées vers l'arrière.

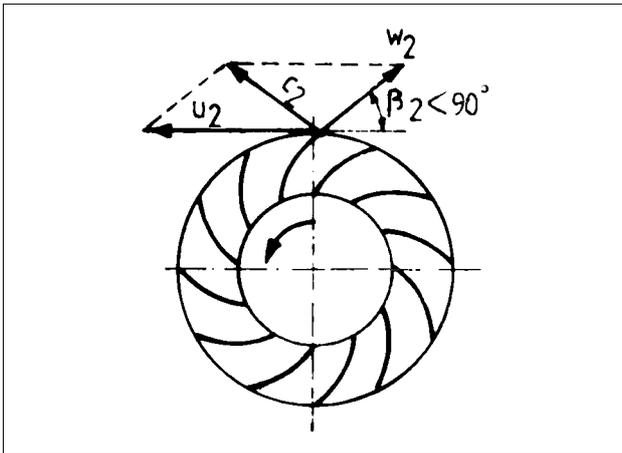


Figure 5.11: Roue avec aubes recourbées vers l'arrière [5.3] (rendement 70-85 %).

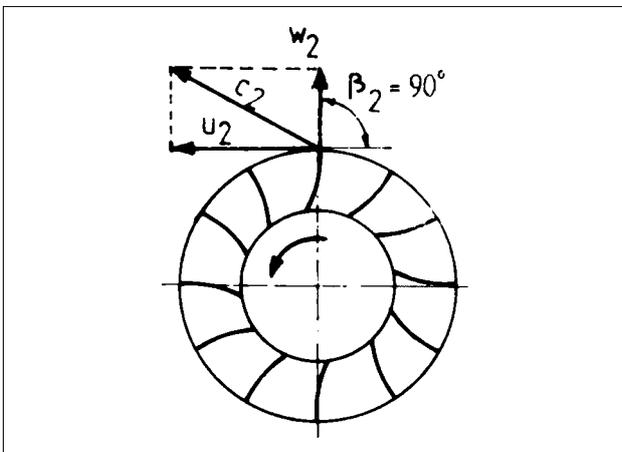


Figure 5.12: Roue à aubes radiales [5.3] (pour le transport de produits légers).

5.2 Courbes caractéristiques

Pour pouvoir juger des qualités spécifiques des différents ventilateurs et les employer correctement, il est nécessaire de connaître les notions les plus importantes. Afin de rester au niveau d'une aide pratique, toute la théorie détaillée qui peut être relue dans les manuels traitant de ce domaine a été laissée de côté.

5.2.1 Ventilateurs radiaux

On effectue la première différenciation des ventilateurs radiaux suivant l'angle de l'aubage à la sortie de la roue.

La roue à aubes recourbées vers l'arrière a le meilleur rendement, alors que celle à aubes recourbées vers l'avant obtient la même pression statique pour une vitesse périphérique inférieure. A taille, débit et pression égale, le ventilateur à aubes recourbées vers l'avant produit donc moins de bruit, mais son rendement est moins bon et sa puissance absorbée plus élevée que celle du ventilateur à aubes recourbées vers l'arrière. Cette comparaison est faite très couramment, mais n'est plus vraie lorsqu'on considère les éléments développés aux figures 5.16 et 5.17.

Les ventilateurs à aubes radiales étant relativement insensibles à l'encrassement, ils sont principalement utilisés pour le transport pneumatique de produits légers. On ne reviendra donc pas sur ce ventilateur dans la suite de ce document.

Représentation des courbes caractéristiques

La représentation des courbes caractéristiques se fait en général en coordonnées bi - logarithmiques, pour gagner de la place. On a ainsi également l'avantage d'avoir la caractéristique de réseau et les lignes d'égal rendement sous forme de droites, parallèles. La représentation est limitée au domaine où les performances du ventilateur sont optimales.

Le fabricant indique en général, outre les courbes caractéristiques du ventilateur pour différentes vitesses de rotation, les courbes de: puissance absorbée à l'arbre du ventilateur, rendement, puissance sonore.

Puissance absorbée à l'arbre du ventilateur
 La puissance absorbée à l'arbre du ventilateur se calcule de la façon suivante :

$$P = \frac{V \cdot \Delta p_{tot}}{\eta_v \cdot 3600}$$

P Puissance absorbée à l'arbre du ventilateur [W]

Δp_{tot} Pression totale [Pa]

V Débit d'air [m³/h]

η_v Rendement du ventilateur [-]

La puissance absorbée des ventilateurs à aubes recourbées vers l'avant augmente fortement lorsque le débit augmente. On peut voir ce phénomène sur le diagramme, car les courbes de puissance absorbée recoupent très nettement celles de caractéristique du ventilateur. Dans le cas des ventilateurs à aubes recourbées vers l'arrière, les courbes de puissance absorbée et de caractéristique de ventilateur sont subparallèles, ainsi la puissance augmente peu lorsque le débit augmente.

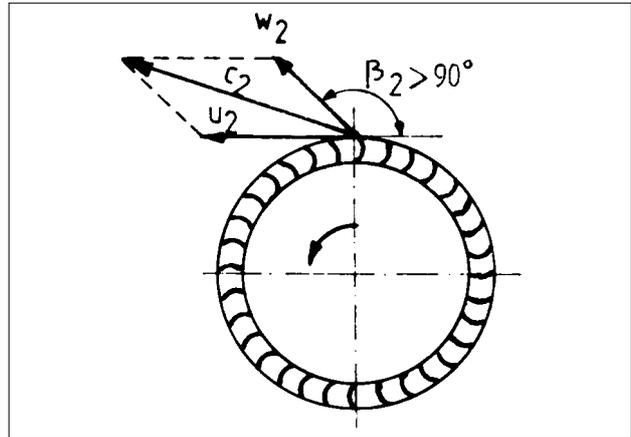


Figure 5.13 :
 Roue à aubes recourbées vers l'avant [5.3] (rendement 50-70 %).

MITTELDRUCKVENTILATOR
ZWEISEITIG SAUGEND MIT RÜCKWÄRTSGEKRÜMMTEN SCHAUFELN.
VENTILATEUR MOYENNE PRESSION
DOUBLE OUIE AVEC AUBES RECOURBÉES A L'ARRIERE

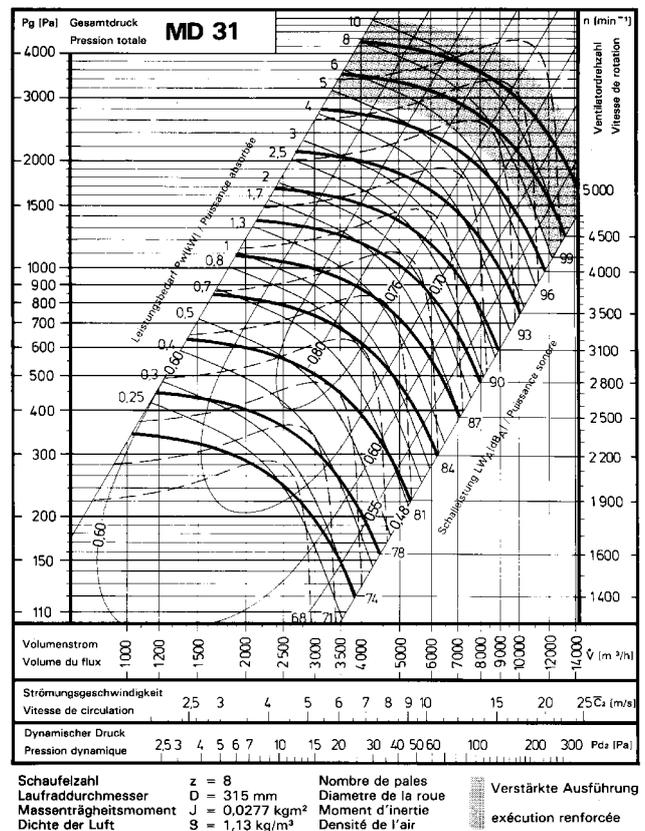


Figure 5.14 :
 Exemple de champ de courbes caractéristiques [5.5].

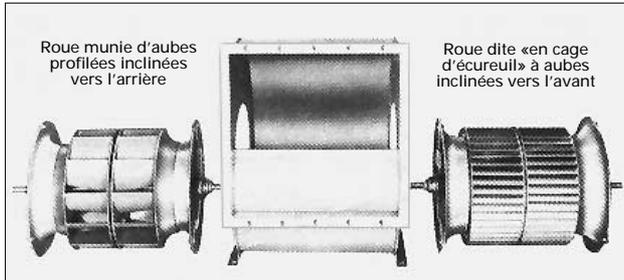


Figure 5.15: Comparaison entre roue à aubes recourbées vers l'avant et vers l'arrière.

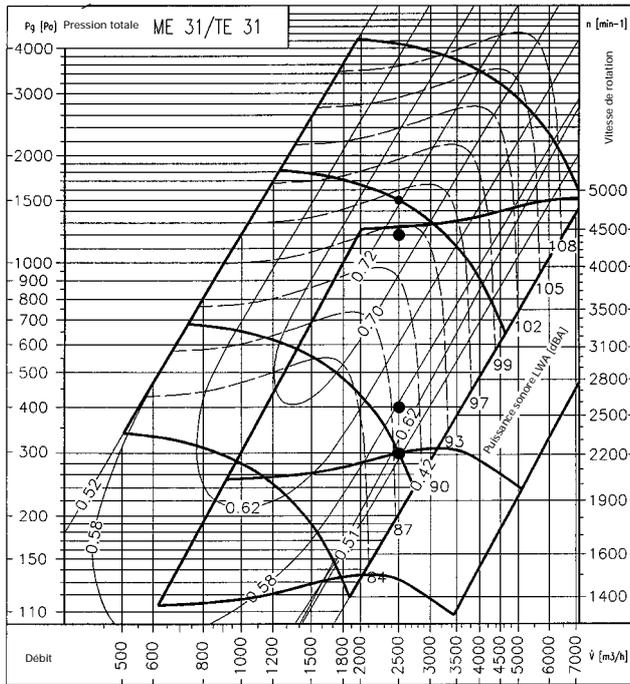


Figure 5.16: Comparaison de courbes de ventilateurs à aubes recourbées vers l'avant et vers l'arrière de même taille [5.5].

Comparaison entre ventilateur à aubes recourbées vers l'avant et vers l'arrière

Les comparaisons effectuées ci-après permettent de mieux comprendre les propriétés de chaque type.

Dans la plupart des ouvrages, on compare les ventilateurs des deux types à taille égale, ce qui crée souvent des confusions et des erreurs d'appréciation. La figure 5.16 montre une telle comparaison. On voit immédiatement que les droites de meilleur rendement sont très écartées l'une de l'autre pour les deux types. Il n'est donc également pas possible d'utiliser les deux ventilateurs pour le même point de fonctionnement.

Lorsqu'on veut augmenter la pression d'un ventilateur existant à aubes recourbées vers l'avant, il est souvent judicieux de mettre une roue à aubes recourbées vers l'arrière à la place, dans la même carcasse.

Exemple :

Admettons que les conditions initiales de fonctionnement se trouvaient à 2500 m³/h et une pression totale de 300 Pa. Si on augmente maintenant seulement faiblement la perte de charge totale à 400 Pa, on obtient le même rendement pour les deux types de roue (58% = pas le meilleur). En augmentant la pression progressivement jusqu'à 1500 Pa, on constate que le rendement du ventilateur à aubes recourbées vers l'arrière devient toujours meilleur, alors que celui de l'autre faiblit de plus en plus.

Caractéristiques	TE31	ME31	TE31	ME31	TE31	ME31
V [m³/h]	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Δp_{tot} [Pa]	300	300	500	500	1200	1200
η_v [%]	60,0	52,0	60,5	60,5	55,0	71,0
L _{WA} [dB(A)]	72,5	87,5	76,5	88,0	86,0	92,0
n [min ⁻¹]	830	2000	1120	2300	1780	3000
P [W]	345	400	575	575	1515	1175

Tableau 5.1: Comparaison des caractéristiques du ventilateur à aubes recourbées vers l'avant TE 31 et vers l'arrière ME 31 [5.5].

Par contre, si au stade du projet on peut choisir entre les deux types de roues, il faut effectuer la comparaison pour le meilleur rendement. On voit qu'ainsi le ventilateur à aubes recourbées vers l'arrière devra le plus souvent être d'une ou deux tailles plus grandes que l'autre.

En comparant le ventilateur TE 31 avec le ME 45 représentés à la figure 5.17 on voit que les lignes de meilleur rendement sont maintenant proches.

Si on les compare pour un point de fonctionnement réaliste, il devient évident, que le ventilateur de deux tailles plus grand (évidemment aussi un peu plus cher) présente de gros avantages.

A 4500 m³/h et 800 Pa, $P = 1430 \text{ W}$ au lieu de 2025 W et $L_W = 77,5 \text{ dB (A)}$ au lieu de 84,5 dB (A). Dans cette situation, le ventilateur à aubes recourbées vers l'arrière, est non seulement meilleur du point de vue énergétique, mais aussi plus silencieux ! C'est seulement lorsqu'on travaille avec des registres de laminage que le ventilateur à aubes recourbées vers l'avant peut redevenir avantageux (voir chapitre 5.5).

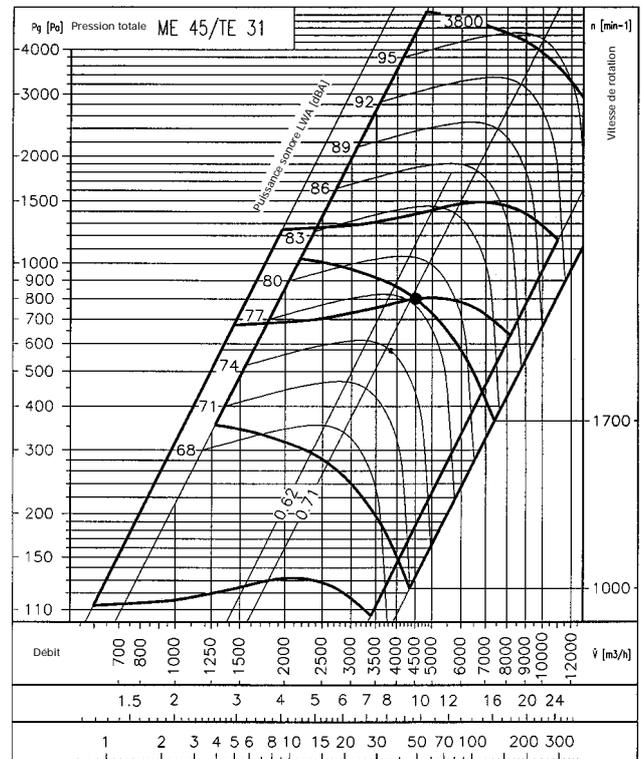


Figure 5.17 :
Comparaison de courbes de ventilateurs à aubes recourbées vers l'avant et vers l'arrière de taille différente [5.5].

5.2.2 Ventilateurs axiaux

Les ventilateurs axiaux sont d'abord classés selon la subdivision suivante (affectation) :

- Hélices ou ventilateurs de brassage sans enveloppe.
- Ventilateurs de paroi ou de fenêtres avec enveloppe.
- Ventilateurs axiaux à enveloppe, exécution avec :
 - hélice seule ;
 - distributeur (amont) + hélice ;
 - hélice + redresseur (aval) ;
 - 2 hélices contra-rotatives.

A toutes les variantes on peut encore ajouter des pavillons et des diffuseurs.

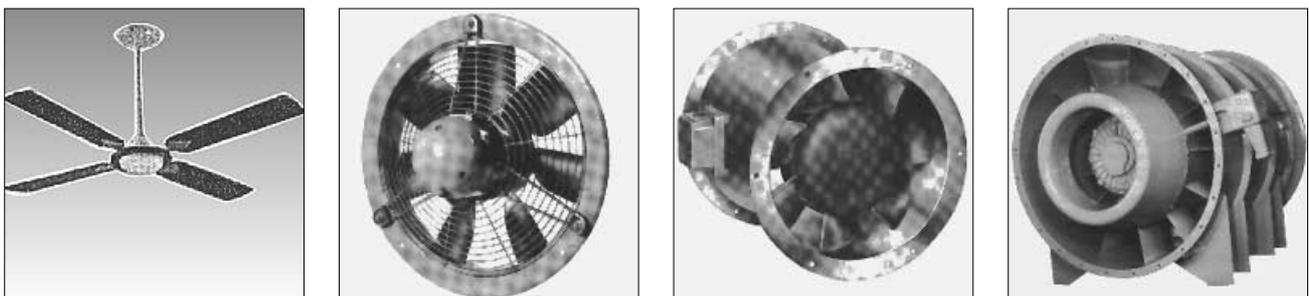


Figure 5.18 :
Types de ventilateurs axiaux (plafonnier, de paroi, à enveloppe simple, à enveloppe avec redresseur et carter moteur).

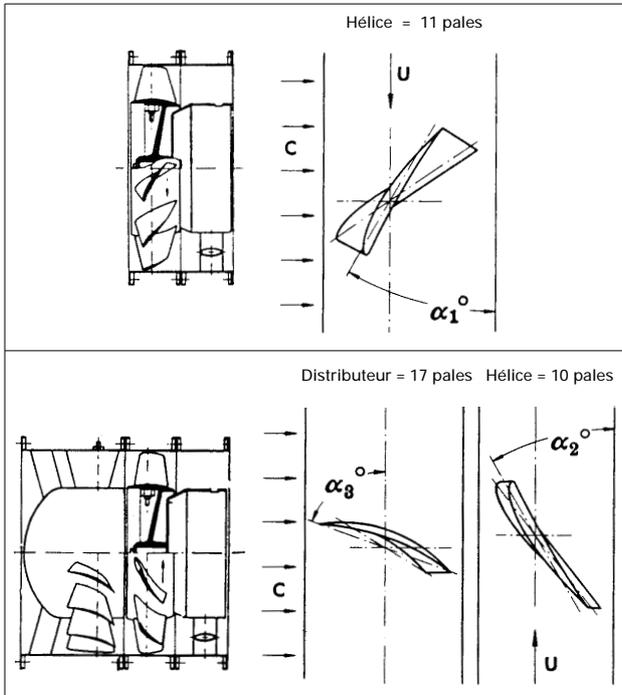


Figure 5.19: Hélices de ventilateur avec et sans distributeur.

On distingue ensuite les ventilateurs suivant le rapport de moyeu. On appelle rapport de moyeu le rapport entre le diamètre du moyeu de l'hélice et le diamètre extérieur de l'hélice. Plus le rapport de moyeu est grand, plus le ventilateur est capable de délivrer des pressions élevées.

Désignation	Rapport de moyeu	Gain de pression
Ventilateur basse pression	0,25 – 0,40	~ 300 Pa
Ventilateur moyenne pression	0,40 – 0,50	~ 3000 Pa
Ventilateur haute pression	0,50 – 0,70	~ 10 000 Pa

Tableau 5.2: Classification des ventilateurs axiaux selon leur rapport de moyeu [5.3].

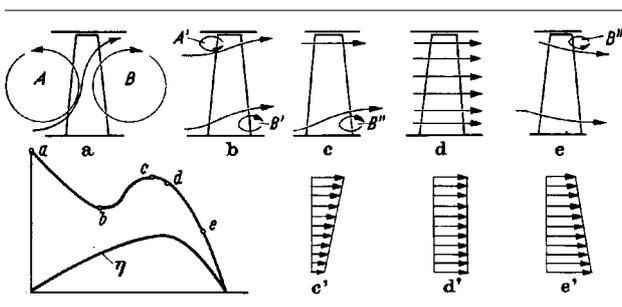
Dans le ventilateur axial, l'air pulsé possède une composante de vitesse radiale, ce qui provoque un mouvement de giration. Cette giration peut être annulée par l'adjonction d'un distributeur ou d'un redresseur ou par un ventilateur à hélices contra-rotatives où la première hélice fait office de distributeur mobile pour la seconde, et la seconde de redresseur mobile pour la première. La suppression de l'effet de giration permet de convertir une partie de l'énergie cinétique en énergie statique, améliorant ainsi grandement le rendement de ce type de ventilateur (+5 à maximum 10%).

Si les pales de l'hélice sont symétriques, il est possible d'inverser le flux d'air. Ce dispositif occasionne par contre une chute du rendement, car normalement les pales ne sont pas symétriques.

Les ventilateurs axiaux, par opposition aux radiaux ont un domaine de fonctionnement instable (pompage) assez étendu. Dans la plupart des champs de courbes caractéristiques cette zone n'est pas représentée. Le danger provient du fait que les meilleurs rendements sont en général près de la zone de pompage, ce qui nécessite des calculs préliminaires précis et une bonne surveillance lors de la mise en service.

Si c'est possible, il vaut mieux prévoir un ventilateur avec l'angle de calage réglable à l'arrêt plutôt qu'un seul angle fixe.

Pour limiter le pompage, il serait possible de monter des anneaux stabilisateurs, particulièrement



a A débit nul, les tourbillons remplissent tout le volume disponible tant à l'aspiration qu'au refoulement.
 b Décollements au dos des pales et à l'entrée.
 c Décollements au dos des pales.
 d Fonctionnement au rendement maximum, écoulement régulier.
 e Fonctionnement en surcharge, déviation du flux d'air en direction du cœur.

Figure 5.20: Représentation schématique des conditions d'écoulement dans un ventilateur axial en fonction de l'étranglement du débit.

lors de fonctionnement parallèle de deux ou plusieurs ventilateurs.

Le pompage est avant tout un problème au moment du démarrage (contre réseau fermé), mais doit également être surveillé en marche normale. Il existe différents systèmes de surveillance par pression différentielle ou microphone.

Représentation des courbes caractéristiques

Les fabricants ne représentent pas tous les performances dans les mêmes conditions du fait des multiples possibilités d'équipements, telles que : diffuseurs, redresseurs, pavillons, etc. Il faut donc toujours bien vérifier dans quelles conditions sont données les caractéristiques pour pouvoir effectuer des comparaisons valables.

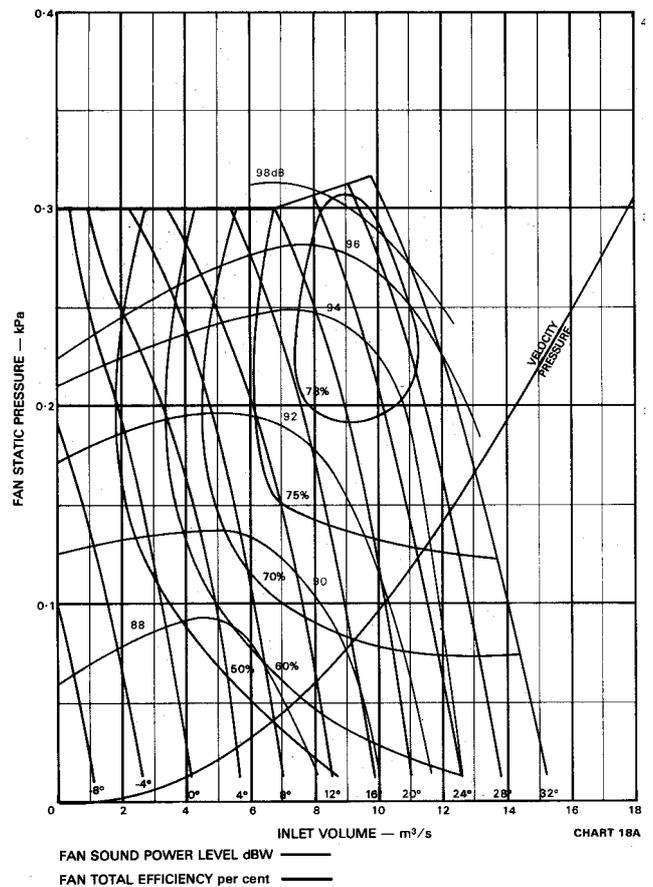
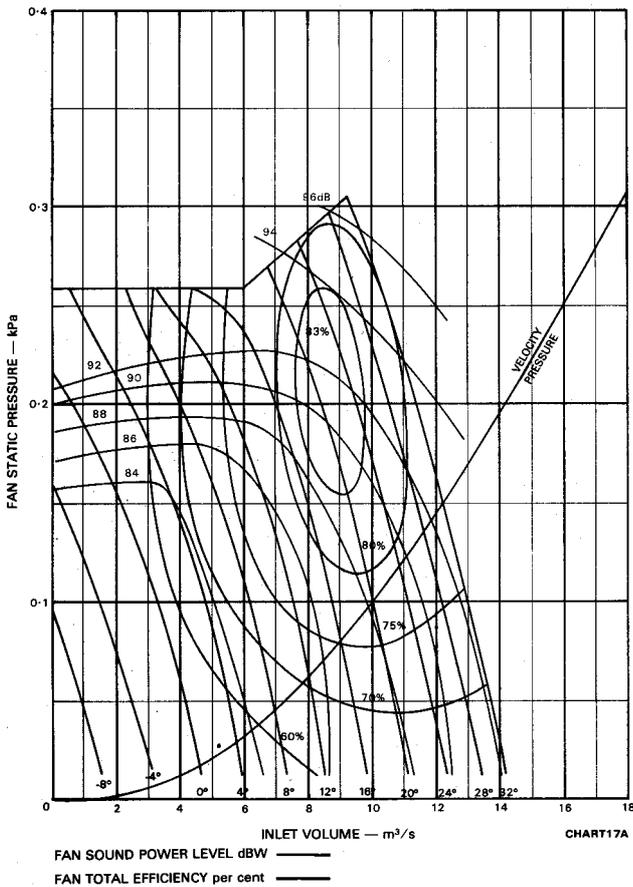


Figure 5.21 : Exemples de courbes caractéristiques de ventilateurs axiaux, avec 6 pales (gauche) et 8 pales (droite), avec angle de calage réglable [5.4].

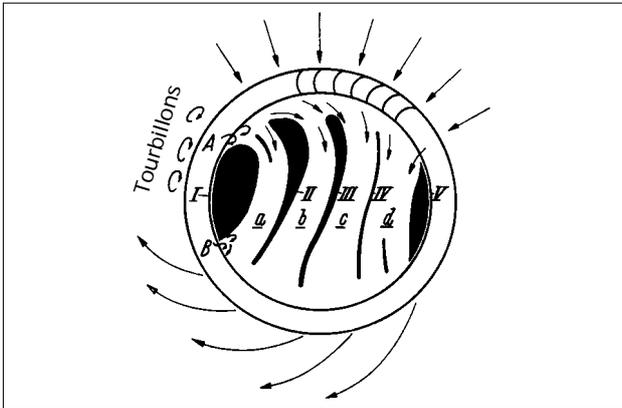


Figure 5.22 : Ventilateur tangential avec aubes directrices dans l'âme [5.2].

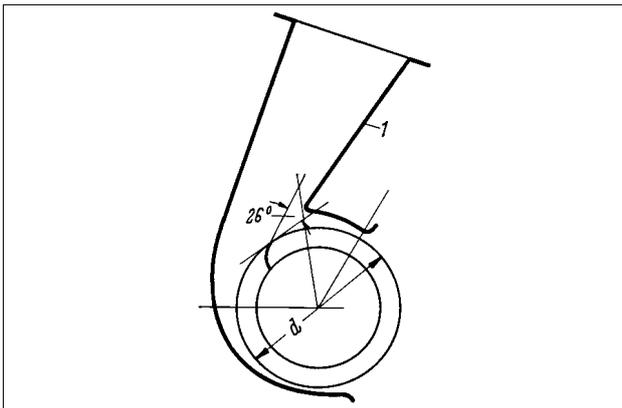


Figure 5.23 : Ventilateur tangential à enveloppe [5.2].

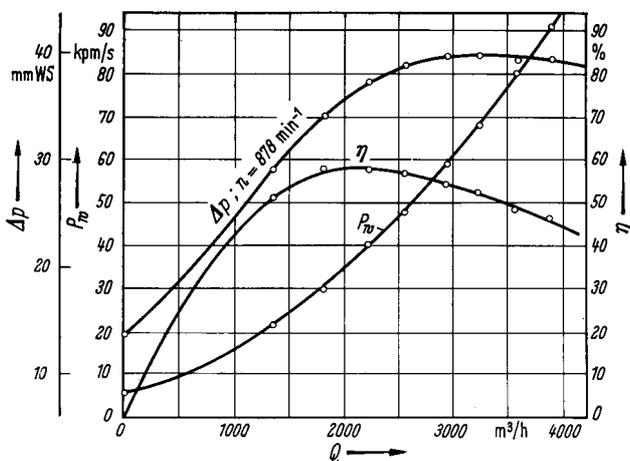


Figure 5.24 : Champ de courbes caractéristiques d'un ventilateur tangential à enveloppe [5.2].

Puissance absorbée à l'arbre du ventilateur
La puissance absorbée à l'arbre du ventilateur se calcule de la même façon que pour les autres ventilateurs, voir 5.2.1.

$$P = \frac{V \cdot \Delta p_{\text{tot}}}{\eta_v \cdot 3600}$$

La courbe caractéristique des ventilateurs axiaux étant généralement très raide, il s'en suit, que la puissance absorbée diminue avec l'augmentation de débit du fait de la très forte chute de la pression disponible.

La raideur de la courbe caractéristique présente l'avantage de permettre de grosses variations de pression sans grande variation du débit (particulièrement avec les ventilateurs contra-rotatifs), ce que le ventilateur radial ne permet pas.

Les rendements qu'on peut généralement considérer sont les suivants :

Type de ventilateur	Rendement
Ventilateur de paroi ou de conduit sans aubes directrices	40 à 65%
Avec angle de calage des aubes variable mais sans aubes directrices	70 à 78%
Avec angle de calage des aubes variable et avec aubes directrices	75 à 85%
Ventilateurs contra-rotatifs à angle de calage des aubes variable	80 à 90%

Tableau 5.3 : Plages de rendement des différents types de ventilateurs hélicoïdes [5.3].

5.2.3 Ventilateurs tangentiels

Il existe deux types de ventilateurs tangentiels :
- avec aubes directrices dans l'âme (figure 5.22).
- sans aubes, mais avec une enveloppe spécialement formée (figure 5.23).

La figure 5.24 représente un exemple de courbe caractéristique d'un ventilateur du type de celui de la figure 5.23.

Le principal défaut de ce type de ventilateur est son mauvais rendement qui ne dépasse pas 60%. Il est malgré tout typiquement utilisé dans les appareils où la place disponible est très limitée tels que :

- ventilo-convecteurs ;
- climatiseurs ;
- rideaux d'air.

5.3 Règles de similitude

Liste des symboles utilisés :

V	Débit volume [m ³ /h] à diviser par 3600 ou le [m ³ /s] (à ne pas confondre avec le débit masse)
Δp	Perte de charge [Pa]
ρ	Poids spécifique de l'air [kg/m ³]
T	Température absolue (0°C = 273 K) [K]
P	Puissance absorbée du ventilateur [W]
n	Vitesse de rotation [t/min ou min ⁻¹]
η	Rendement [-]
d	Ø ouïe d'aspiration [mm ou m]

Résumé

- Ces règles permettent de simuler le comportement de réseaux et de ventilateurs (plus grands ou plus petits) pour différents points de fonctionnement.

5.3.1 Influence du poids spécifique de l'air

Les indications du fabricant sont toujours valables pour un poids spécifique donné, précisé sur les documents.

Le débit d'air reste constant lorsque, à vitesse de rotation constante, le poids spécifique de l'air change (respectivement la température absolue du même fluide change). Pour cette raison, on désigne aussi parfois les ventilateurs comme des machines volumétriques. La pression (statique, dynamique, totale), et par là même le besoin en puissance, se modifie proportionnellement à la variation du poids spécifique (donc du débit masse).

$$V = \text{constant}$$

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

Exemple

Un ventilateur tourne à 2000 min⁻¹ et ne débite que 80% du débit d'air désiré. A quelle vitesse doit-il tourner pour atteindre le débit nominal souhaité ?

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\Rightarrow n_2 = \frac{n_1 \cdot V_2}{V_1}$$

$$n_2 = \frac{2000 \cdot 100}{80} = 2500 \text{ min}^{-1}$$

Exemple

Grâce à une modification du système d'insufflation dans le local, le débit d'air de 3600 m³/h d'un ventilateur peut être ramené à la moitié. A 3600 m³/h, il avait un rendement global de 70% et une pression totale de 400 Pa.

$$P_1 = \frac{\Delta p_{\text{tot}} \cdot V}{\eta} = \frac{400 \cdot 3600}{0,7 \cdot 3600} = 571 \text{ W}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{3600}{1800} = 2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3} = 2^3 = 8$$

$$\Rightarrow P_2 = \frac{P_1}{8} = \frac{571}{8} = 71 \text{ W}$$

L'exemple ci-dessus a été réalisé à rendement constant, ce qui n'est jamais vraiment le cas. Il faut donc contrôler si le rendement du ventilateur du premier point de fonctionnement est toujours valable, ou s'il faut tenir compte des différences rendement (voir chapitre 6 pour l'influence de la variation de rendement du moteur, de la transmission, etc.). Ce calcul se fait de la façon suivante :

$$P_{2 \text{ eff}} = \frac{P_2 \cdot \eta_1}{\eta_2}$$

5.3.2 Lois de proportionnalité

On applique les lois de proportionnalité lorsqu'on modifie la vitesse de rotation d'un ventilateur donné.

Pour un ventilateur donné tournant à vitesse variable, on déduit de la déformation du triangle des vitesses que le débit varie comme la vitesse de rotation, la pression comme le carré de la vitesse de rotation et la puissance absorbée comme le cube de la vitesse de rotation.

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^1$$

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

5.3.3 Lois d'affinité

Ces lois s'appliquent à des ventilateurs tournant à même vitesse et géométriquement semblables, dont on agrandit ou diminue toutes les dimensions proportionnellement :

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3$$

$$\frac{\Delta p_{\text{tot } 1}}{\Delta p_{\text{tot } 2}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^5$$

Exemple

Un ventilateur dont le diamètre de l'ouïe d'aspiration est de $d_1 = 315$ mm, débit $V_1 = 1500$ m³/h pour une vitesse de rotation de $n = 1000$ min⁻¹. A quelle vitesse doit tourner un ventilateur semblable, si le diamètre de l'ouïe d'aspiration est $d_2 = 250$ mm et si le débit reste identique ?

D'après les lois d'affinité :

$$\frac{V_1}{V_2'} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3$$

$$\Rightarrow V_2' = \frac{V_1}{(d_1/d_2)^3}$$

$$V_2' = \frac{1500}{(315/250)^3} = 750 \text{ m}^3/\text{h}$$

D'après les lois de proportionnalité :

$$\frac{n_2'}{n_2} = \frac{V_2'}{V_2}$$

$$\Rightarrow n_2 = \frac{n_2'}{(V_2'/V_2)}$$

$$n_2 = \frac{1000}{(750/1500)} = 2000 \text{ min}^{-1}$$

Résumé

- L'analyse de la courbe caractéristique du réseau et du point de fonctionnement permet de comprendre les relations qui régissent le comportement aérodynamique d'une installation. Dans le cadre de RAVEL, ce sujet n'est pas autrement développé. Une liste d'ouvrages à consulter se trouve à la fin du chapitre.

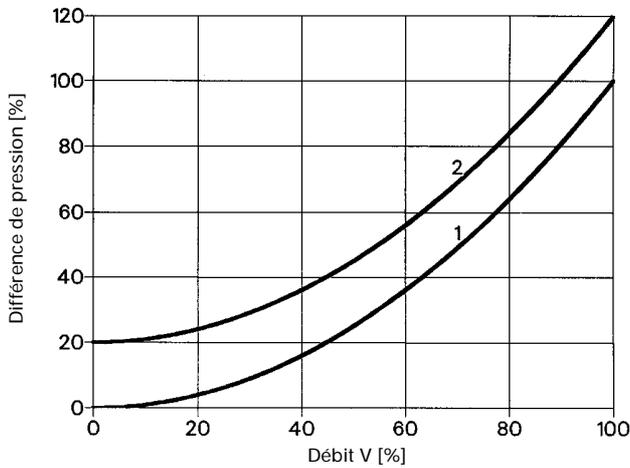


Figure 5.25 :
Courbe caractéristique du réseau, écoulement turbulent.
1 : sans perte de charge externe constante.
2 : avec perte de charge externe constante, (par exemple pour régulation de débit d'air.)

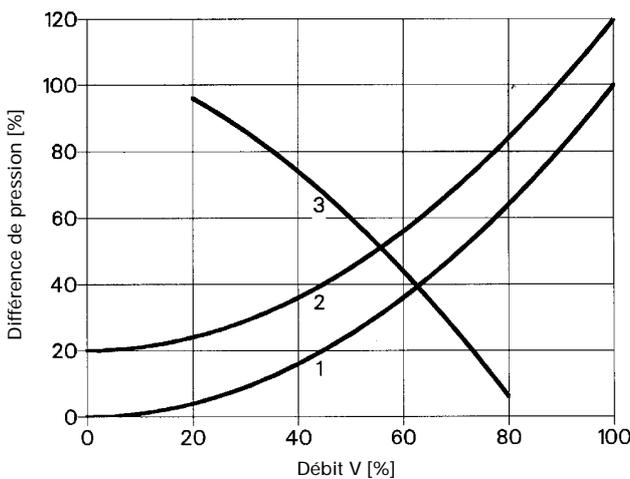


Figure 5.26 :
Point de fonctionnement, à l'intersection de la courbe caractéristique du réseau et de celle du ventilateur.
1 : Caractéristique du réseau sans perte de charge externe constante.
2 : Caractéristique du réseau avec perte de charge externe constante.
3 : Courbe caractéristique du ventilateur.

5.4 Courbe caractéristique du réseau et point de fonctionnement

La perte de charge d'un réseau se compose de l'addition de toutes les pertes de charges individuelles se trouvant sur le trajet, qu'elles soient singulières ou réparties.

Le mémento des pertes de charge de I.E. Idel'cik est l'ouvrage à peu près le plus complet traitant de ce sujet, il existe en français, voir [5.7].

La plupart des éléments du réseau sont traversés en régime turbulent, si bien que la résistance au passage est proportionnelle à la pression dynamique et donc au carré du rapport des débits. Des pertes de charge singulières en régime laminaire, avec une relation linéaire entre la perte de pression et le débit, sont très rares, du fait des vitesses rencontrées usuellement. On ne les rencontre pratiquement que dans les ultrafiltres, où la vitesse dans le substrat du filtre est de l'ordre de 2 cm/s.

Dans la figure 5.26, le point de fonctionnement du ventilateur se trouve à l'intersection de la courbe caractéristique du réseau et de celle du ventilateur.

On peut trouver une présentation des diverses combinaisons de courbes de réseaux et de ventilateurs dans par exemple [5.1, chapitre 7.7].

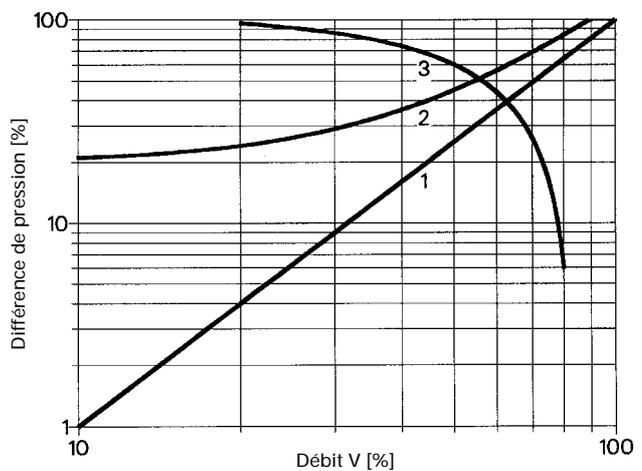


Figure 5.27 :
Représentation de courbes caractéristiques en coordonnées bilogarithmiques.

5.5 Régulation du débit

Dans les installations de ventilation modernes, il y a plusieurs raisons pour choisir une variation de débit en continu ou par paliers. Lors de conditions atmosphériques extrêmes en été ou en hiver, un débit d'air bien adapté permet une réduction de la consommation d'énergie. Comme on l'a vu au paragraphe 5.3.2, la puissance absorbée à l'arbre du ventilateur varie en fonction du cube du rapport des vitesses de rotation, respectivement de débit d'air ; il est alors clair qu'un réglage en fonction des besoins prend tout son sens lorsqu'il s'agit de réduire la consommation d'énergie du transport de l'air.

Pour les ventilateurs radiaux, il existe les possibilités de régulation suivantes :

- Régulation de la vitesse de rotation :
 - courroies ajustables ;
 - variation de la vitesse du moteur (chapitre 6).
- Régulation par aubage mobile de prérotation :
 - prérotation à l'ouïe d'aspiration.
- Régulation par bypass :
 - clapet court-circuit.
- Régulation par étranglement :
 - clapet d'étranglement.

Pour une utilisation rationnelle de l'électricité, il ne suffit pas de prendre en compte la puissance nécessaire à l'arbre du ventilateur, mais aussi la puissance électrique qui sera tirée du réseau. Les figures suivantes donnent un aperçu qualitatif de la problématique. L'observation des figures de la page suivante montre que la régulation de la vitesse de rotation est avantageuse non seulement en regard de l'économie d'énergie, mais aussi du niveau de bruit.

Résumé

La capacité de régler le débit joue un rôle très important dans les possibilités d'économie d'énergie électrique.

- Eviter les régulations par bypass
- La régulation par aubage mobile de prérotation a un champ d'application très réduit pour les ventilateurs radiaux. En raison de la complexité mécanique du système, elle est de plus en plus remplacée par la régulation de la vitesse de rotation.
- La régulation du débit par étranglement peut se justifier pour de petits ventilateurs à aubes recourbées vers l'avant.
- Pour les ventilateurs, la régulation de la vitesse de rotation est la solution la plus élégante.

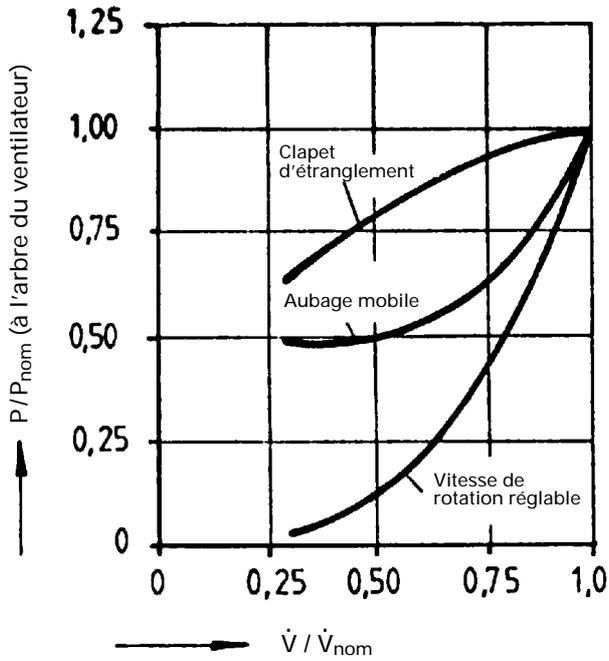


Figure 5.28: Puissance absorbée à l'arbre pour différents systèmes de réglage de débit.

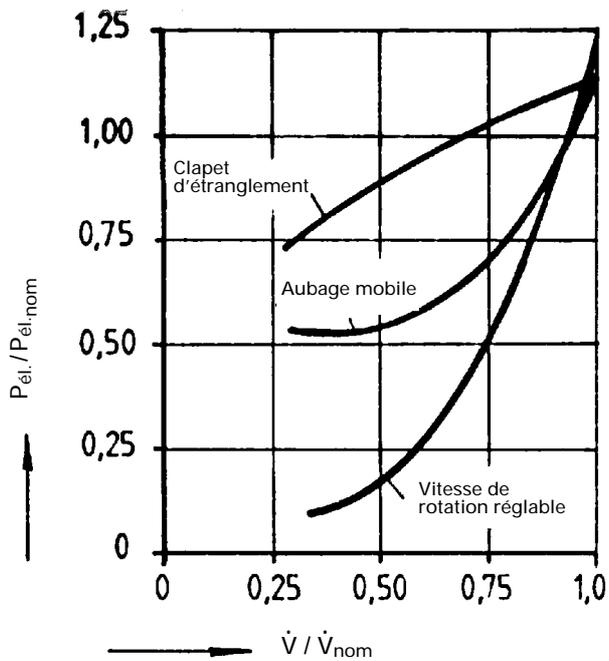


Figure 5.29: Puissance électrique absorbée pour différents systèmes de réglage de débit [5.3].

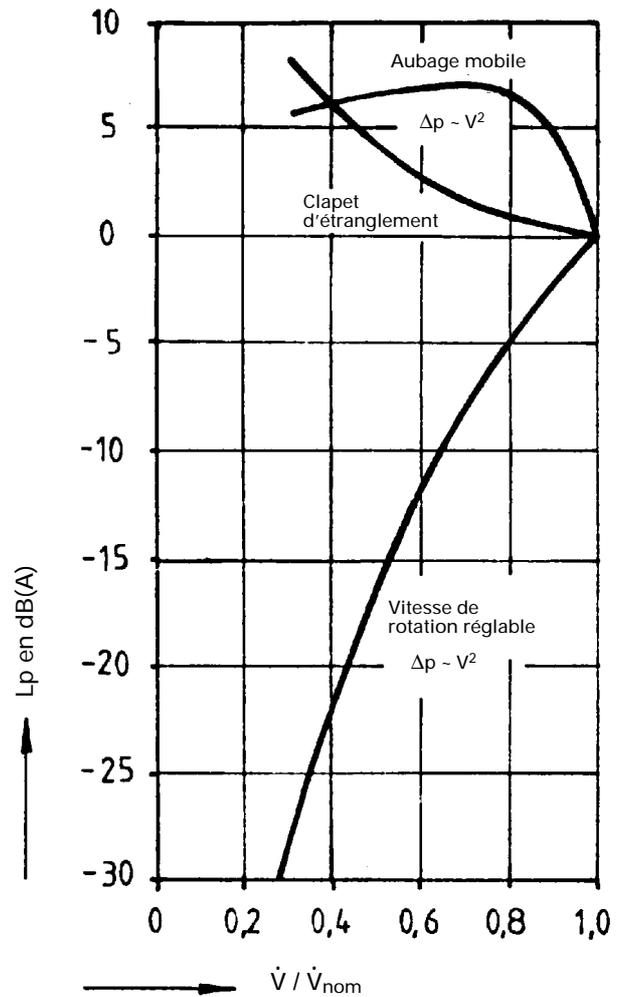


Figure 5.30: Variation du niveau de bruit pour différents systèmes de réglage de débit [5.3].

Régulation par bypass

Une régulation par bypass n'a pas sa place dans le cadre d'une utilisation rationnelle de l'énergie électrique, parce que si ce système permet de diminuer le débit dans le réseau de gaines, celui du ventilateur augmente entraînant avec lui la puissance absorbée. L'augmentation de puissance absorbée peut être très conséquente et surcharge même dans certains cas le moteur.

L'exemple de la figure 5.31 montre ce qui se passe lorsque le bypass est ouvert. Le débit dans le réseau passe de 1 à 4 (de 60 000 à 48 000 m³/h) ; en même temps, le ventilateur transporte plus d'air (76 000 m³/h) en raison de la diminution de la pression. Le rendement baisse alors de 80% à 59%. Une régulation par bypass a donc pour conséquence une diminution du débit du réseau et une augmentation de la consommation d'électricité !

Pour des ventilateurs à aubes recourbées vers l'avant, l'ouverture du bypass pourrait même provoquer un déplacement du point de fonctionnement tel, qu'il en résulterait une augmentation de débit dans le réseau.

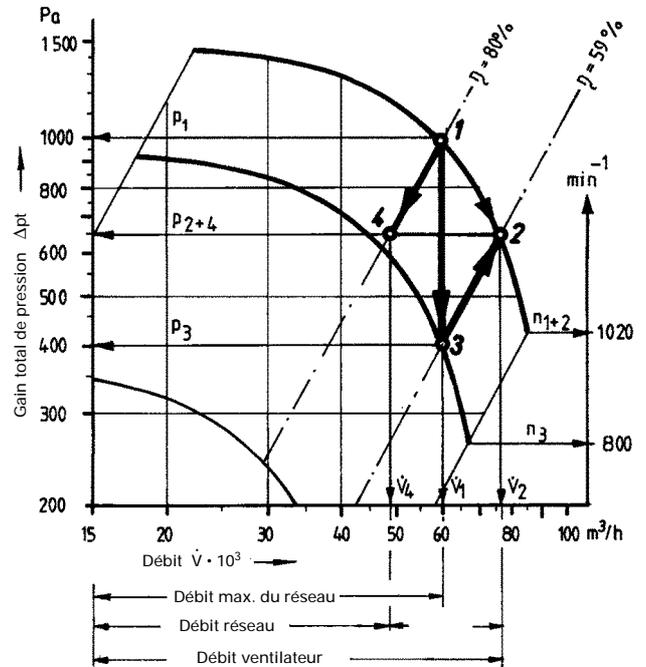


Figure 5.31 :
Exemple de régulation par bypass [5.3].

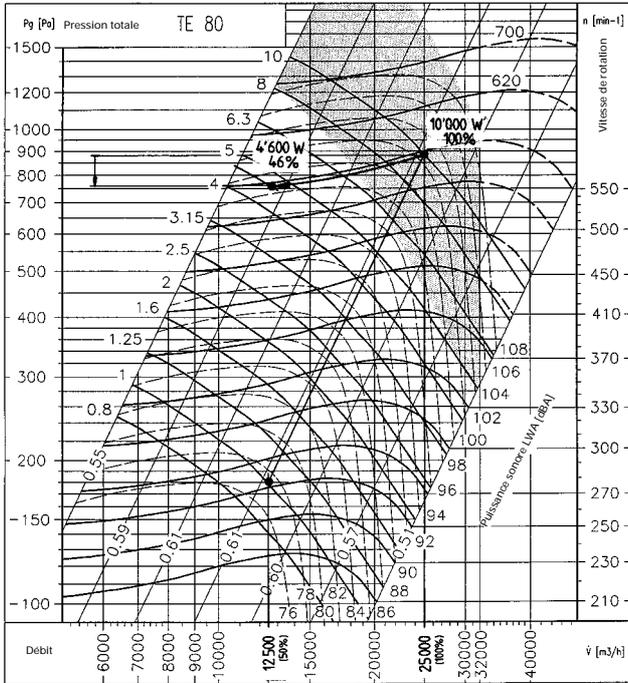


Figure 5.32: Régulation par étranglement d'un ventilateur à aubes recourbées vers l'avant. Lorsque le débit passe de 100 à 50 %, la puissance absorbée passe de 100 à 46 %.

Régulation du débit par étranglement (ou laminage)

Pour des petits ventilateurs, il faut contrôler concrètement comment se comporte la puissance absorbée lors de l'étranglement. La régulation par étranglement peut, dans certains cas, être énergétiquement meilleure que la régulation de la vitesse de rotation, car les pertes de celle-ci pour des petits moteurs et de petits écarts par rapport au débit nominal, peuvent être plus grandes. Si, pour un petit ventilateur, on choisit une régulation par étranglement, il faut alors veiller à ce que le point de fonctionnement le plus fréquent se trouve dans la zone de rendement optimal. Dans tous les cas, il faut choisir le débit maximal si possible à droite de la plage de rendement optimale. Les figures 5.32 et 5.33 montrent que le ventilateur à aubes recourbées vers l'avant est mieux adapté à une régulation par étranglement que le ventilateur à aubes recourbées vers l'arrière, pour lequel la puissance absorbée ne diminue que peu à cause de l'augmentation de pression statique.

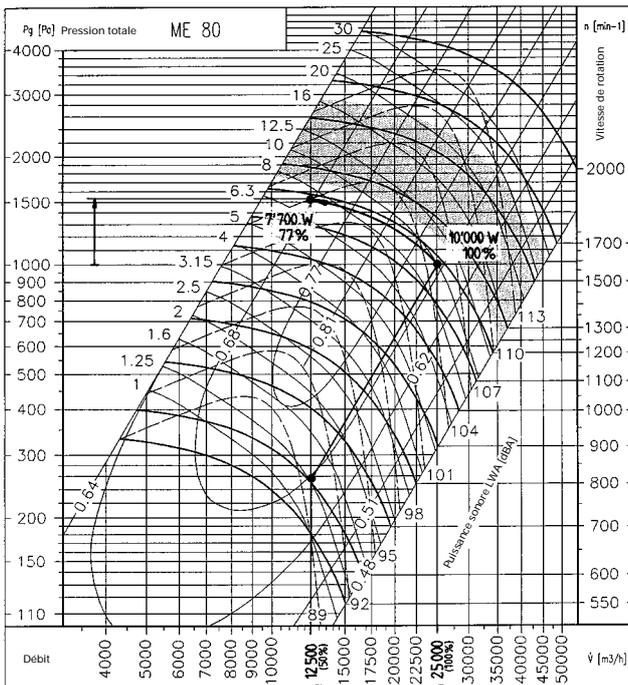


Figure 5.33: Régulation par étranglement d'un ventilateur à aubes recourbées vers l'arrière. Lorsque le débit passe de 100 à 50 %, la puissance absorbée passe de 100 à 77 %.

Régulation par aubage mobile de prérotation

C'est un moyen économique de réduire progressivement le débit aux $\frac{2}{3}$ de la valeur maximale. Ceci se fait à l'aide d'ailettes orientables. Il existe deux dispositifs à écoulement axial et un dispositif à écoulement radial, suivant le type de raccordement et la place à disposition à l'aspiration.

Pour un ventilateur axial, la prérotation se fait soit au moyen d'un distributeur, soit à l'aide d'une hélice amont tournant en sens inverse, soit encore à l'aide de l'hélice elle-même, auquel cas, c'est le redresseur aval qui réoriente le flux.

L'aubage mobile de prérotation permet d'incliner les filets de fluide avant leur entrée dans la roue. Suivant le sens de prérotation, on peut obtenir un sens de giration identique ou opposé.

Une régulation par aubage mobile de prérotation ne convient que pour des ventilateurs axiaux ou des ventilateurs à aubes recourbées vers l'arrière. Dans le cas de ventilateurs à aubes recourbées vers l'avant, qui ont des roues plutôt larges, le mouvement rotatoire influencerai beaucoup trop l'écoulement tridimensionnel dans le roue ainsi que l'écoulement secondaire après la roue, avec les pertes et instabilités qui en découlent.

A chaque position des aubes directrices correspond une nouvelle courbe caractéristique de ventilateur qui va se situer en dessous de la courbe caractéristique correspondant à un aubage entièrement ouvert.

A l'opposé de la régulation par étranglement, on voit pour la régulation par aubage de prérotation, une diminution du débit ainsi que du gain de pression, dans la mesure désirée, tout en ayant un point de fonctionnement situé dans la plage de rendement optimale.

La figure 5.35 montre l'effet d'une régulation par aubage de prérotation et par étranglement pour un débit réduit à $\frac{2}{3}$ de la valeur nominale. Le point de fonctionnement se déplace de 1 à 3 pour la régulation par aubage de prérotation et de 1 à 2 pour la régulation par étranglement. Ceci permet une réduction de la puissance absorbée de 100 à 70% pour la régulation par étranglement, mais de 100 jusqu'à 50% pour celle par aubage de prérotation.

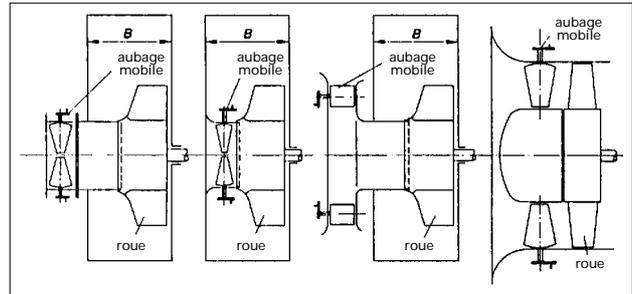
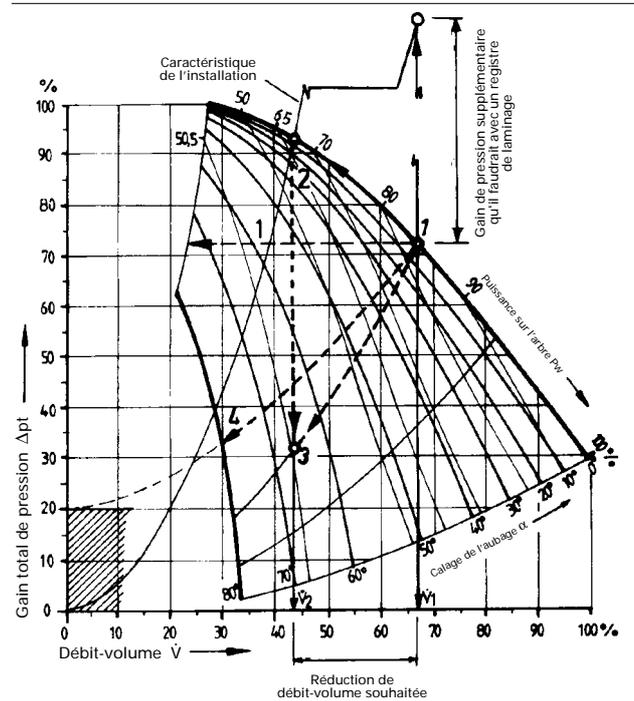


Figure 5.34 : Différents types d'aubages mobiles de prérotation [5.1].



- 1 Point de fonctionnement à volume et débit nominal.
- 2 Point de fonctionnement à débit réduit par registre de laminage.
- 3 Point de fonctionnement à débit réduit par aubage mobile de prérotation.

Figure 5.35 : Comparaison entre une régulation par aubage de prérotation et une régulation par étranglement [5.3].

Si on veut régler en maintenant une pression ou un débit constant, il faut alors veiller à ce que les points de fonctionnement les plus fréquents tombent dans la plage de rendement optimal.

Si on veut suivre la courbe caractéristique du réseau, on peut prévoir un moteur à deux vitesses afin d'avoir une zone de réglage plus grande à disposition.

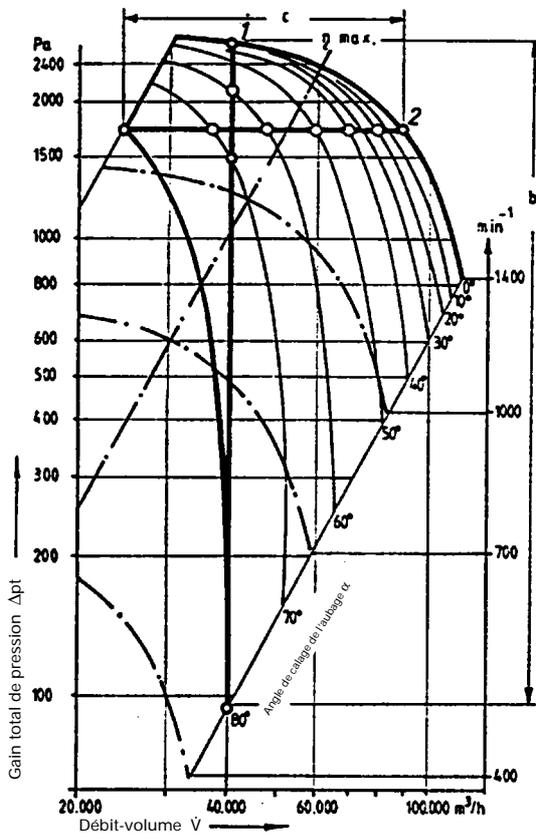


Figure 5.36 : Contrôle des points de fonctionnement dans le domaine de réglage.

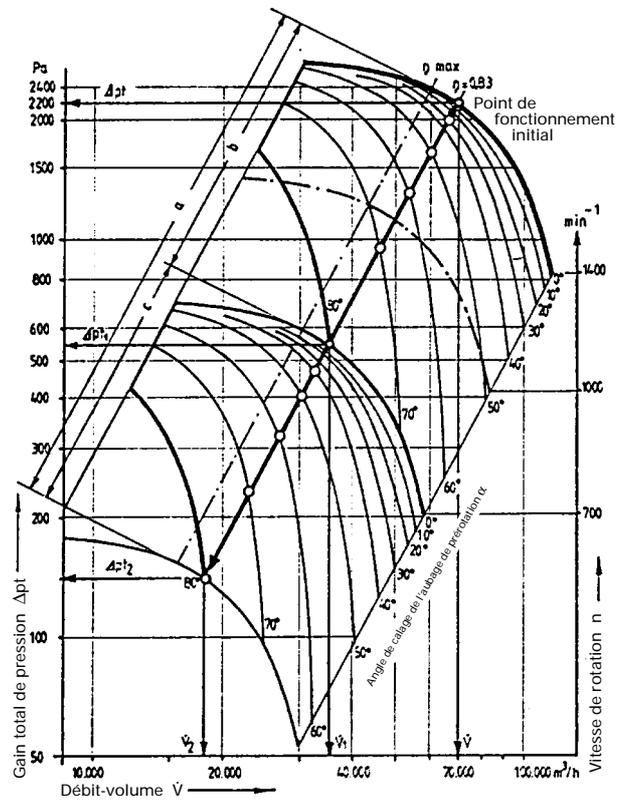


Figure 5.37 : Combinaison entre régulation de la vitesse de rotation par moteur à nombre de pôles variables et aubage de prérotation [5.3].

Régulation de la vitesse de rotation

La solution de réglage la plus élégante pour un ventilateur est celle par régulation de la vitesse de rotation. Les progrès actuels et futurs dans le domaine de la régulation des moteurs (voir chapitre 6) donnent les meilleures chances d'avenir au ventilateur avec réglage de la vitesse de rotation. Une autre amélioration serait de renoncer à l'entraînement par courroie. La tendance d'avenir est d'accoupler à nouveau le moteur directement au ventilateur. Pour le ventilateur axial, ce type de construction est déjà réalisé.

Pour finir, la figure 5.38 montre la puissance absorbée à l'arbre d'un ventilateur par un aubage mobile de prérotation combiné avec un moteur à nombre de pôles variable, comparé à une régulation de vitesse de rotation.

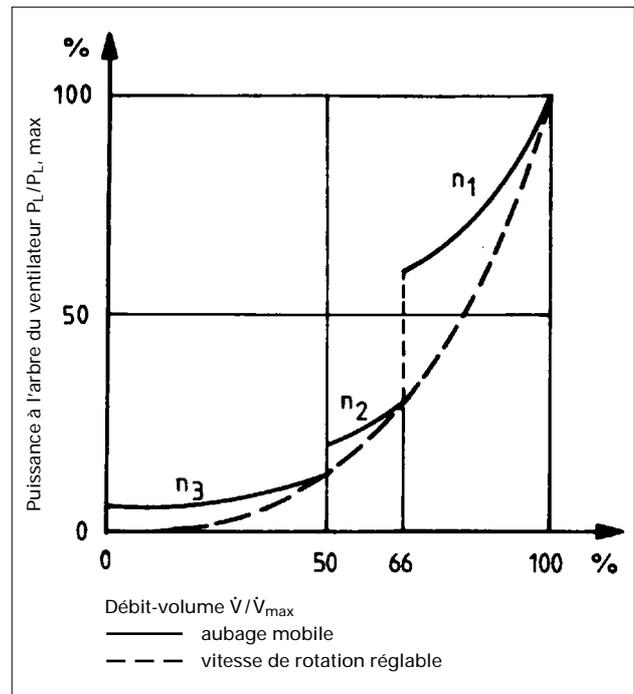


Figure 5.38: Puissance absorbée à l'arbre du ventilateur par un aubage de prérotation combiné avec un moteur à nombre de pôles variable, comparé à une régulation de vitesse de rotation [5.1].

5.6 Pertes lors du montage

Les champs de courbes caractéristiques des ventilateurs sont établies d'après des essais effectués sur bancs normalisés.

Dans la pratique, les ventilateurs ne satisfont pas aux conditions idéales des bancs d'essais. Il faut donc appliquer un certains nombres de corrections sous forme de pertes de charges singulières qu'on trouve dans la littérature (en particulier les corrections pour aspiration libre du ventilateur dans un caisson de monobloc). Lorsque l'implantation est judicieuse, aussi bien du côté aspiration que du côté refoulement, on estime que l'augmentation de perte de charge se situe entre 1 et 2 zeta.

Si le ventilateur est raccordé directement tant côté aspiration que côté refoulement, les pièces de transition aux raccordements doivent être faites très soigneusement, de manière à pouvoir obtenir un meilleur résultat qu'avec un monobloc de bonne qualité.

Bibliographie chapitre 5

- [5.1] Arbeitskreis des Dozenten für Klimatechnik
Lehrbuch der Klimatechnik
Band 3, Bauelemente. Verlag C.F.Müller Karlsruhe, 2. Auflage. ISBN 3-7880-7207-5
- [5.2] Bruno Eck
Ventilatoren
Springer-Verlag, 5. Auflage. ISBN 3-540-05600-9
- [5.3] J. Lexis
Pratique des ventilateurs
Les Editions Parisiennes, 1991. ISBN 2-86 243 029-3
- [5.4] Novenco Variax
Tellus - Variable pitch axial flow fans
DK - 4700 Naestved
Représenté en Suisse par : Stäfa Ventilator
- [5.5] Paul Wirz SA
Construction de ventilateurs
3000 Berne 22
- [5.6] Recknagel, Sprenger, Hönmann
Manuel pratique du génie climatique
Pyc Edition Paris, édition 1986. 2^e édition française. ISBN 2-85330-084-6
- [5.7] I. E. Idel'cik
Mémento des pertes de charges
Editions Eyrolles, 3^e édition française 1986, 496 pages. ISBN 2 -212 -05900 -0

6. Systèmes d'entraînement pour ventilateurs

6.1	Approvisionnement en énergie	115
6.1.1	Sécurité d'approvisionnement	115
6.1.2	Fréquence et tension	115
6.1.3	Réseau de distribution électrique	117
6.2	Moteurs électriques (moteurs asynchrones triphasés)	118
6.2.1	Types de construction	118
6.2.2	Normalisation	119
6.2.3	Propriétés générales des moteurs à cage d'écureuil	124
6.3	Mesure de la puissance	129
6.4	Transmission	130
6.5	Régulation de la vitesse de rotation	131
6.5.1	Modification du nombre de paires de pôles	131
6.5.2	Régulation par modification du glissement	133
6.5.3	Convertisseurs de fréquence	134
6.5.4	Modification du rendement	135
6.6	Protection contre les explosions	136
6.7	Acoustique	137
	Bibliographie chapitre 6	138

6. Systèmes d'entraînement pour ventilateurs

6.1 Approvisionnement en énergie

6.1.1 Sécurité d'approvisionnement

Pour les régions de Suisse qui ne sont pas trop isolées, l'approvisionnement est suffisamment bien assuré pour qu'il ne soit en général pas nécessaire de prévoir un générateur de secours pour les installations de ventilation.

Des observations sur plusieurs années, à l'hôpital universitaire de Zurich, ont montré que plus de 90% des pannes avaient leur origine entre la station de transformateurs du bâtiment et les bornes du moteur. Pour cette raison, même les installations de ventilation pour les salles d'opération et les stations de soins intensifs ne sont par raccordées au réseau de secours.

Bien entendu, il doit exister un concept de conduite à tenir lors de coupures prévues, par exemple essais du réseau de secours. Pour les cas particulièrement délicats (exemple: unités stériles), on ne conserve que les fonctions permettant un maintien d'une surpression minimale.

Avant de renoncer à un réseau de secours, il faudrait procéder à une analyse soignée des conséquences d'une coupure de courant de longue durée, en tenant compte de toutes les influences possibles, ainsi que de toutes les mesures qui peuvent être prises.

Pour des régions isolées, les compagnies d'électricité donnent des informations sur la fréquence et la durée des coupures de courant survenues.

6.1.2 Fréquence et tension

Pour l'heure, la Suisse se prépare au changement de tension du réseau prévu pour l'Europe. Les tensions encore usuelles aujourd'hui et les nouvelles tensions européennes normalisées sont comparées dans la figure 6.1.

Si un moteur prévu pour fonctionner à la valeur nominale de la tension du réseau, fonctionne à la

Les systèmes d'entraînement de ventilateurs sont considérés dans la documentation suivante en tant que combinaison entre

- le système d'approvisionnement en énergie + réglage de vitesse (convertisseur, hachage de phase, etc.),
- la machine d'entraînement (moteur) et
- la transmission (par courroie ou directe).

La technique de ventilation et de climatisation utilise presque exclusivement des moteurs électriques pour l'entraînement des ventilateurs. L'approvisionnement en énergie est donc considéré ici sous l'angle électrique.

Du fait que la majorité des entraînements électriques utilisés aujourd'hui sont des moteurs asynchrones triphasés, les autres types de moteurs ne sont pas traités dans le présent document, exception faite des petits moteurs monophasés utilisés en ventilation.

Ces derniers temps on attache aussi plus d'importance à la transmission; d'une part, la courroie plate est de plus en plus utilisée à la place de la courroie trapézoïdale, d'autre part, du fait du réglage de vitesse des moteurs, on peut revenir à l'accouplement direct en supprimant du même coup les pertes par transmission.

Pour utiliser rationnellement l'énergie électrique, il est très important d'analyser le problème de l'entraînement dans son ensemble, en tenant compte du rendement de chaque élément, que ce soit à pleine charge ou à charge partielle, car les rendements à charge partielle sont toujours plus faibles (peu ou beaucoup) que ceux à pleine charge, quel que soit l'élément considéré (valable également pour le ventilateur).

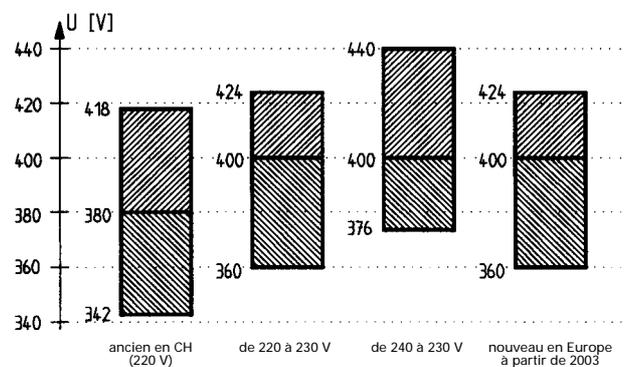


Figure 6.1: Adaptation de la tension en Europe à 230/400 V, 50 Hz.

limite inférieure de la tolérance de tension du réseau, les conséquences sont les suivantes :

Négatives	le glissement augmente ; la vitesse de rotation diminue ; le risque de surcharge thermique augmente ; le rendement diminue.
Neutres	le couple de démarrage baisse.
Positives	le cosinus phi augmente ; le courant de démarrage diminue.

L'influence de la tension du réseau sur la puissance active s'exprime comme suit :

$$P = P_N \left(\frac{U}{U_N} \right)^a$$

P	puissance active à la tension U
P _N	puissance active nominale à la tension U _N
U	tension effective
U _N	tension nominale
a	exposant de l'influence de la tension

Pour les moteurs $a = 0$ ($\Rightarrow (U/U_N)^0 = 1$). C'est-à-dire qu'une modification de la tension n'aura aucune influence sur la puissance active d'un moteur. Au contraire, l'exposant atteint des valeurs de par exemple $a = 1,6$ pour les lampes à incandescence ou $a = 2,0$ pour les appareils de chauffage électrique.

L'augmentation de la tension du réseau est favorable aux producteurs d'électricité, car elle réduit un peu les pertes de transport et améliore donc la capacité de transport des réseaux existants.

Attention : Les chauffages électriques et les aéro-chauffeurs électriques non réglés consomment 20% d'électricité en plus lorsque on monte la tension à la limite supérieure.

Dans nos réseaux, la fréquence du courant triphasé est de 50 Hz, alors que la fréquence normalisée aux Etats-Unis et au Canada est de 60 Hz. En Europe de l'Est, on travaille aussi avec 50 Hz.

Cette différence de fréquence fait, qu'à nombre de pôles identiques, un moteur tourne plus vite à 60Hz qu'à 50 Hz, et que pour un même couple, il fournit une puissance plus élevée.

La puissance absorbée par les ventilateurs augmentant très fortement avec l'accroissement de vitesse dû au passage de 50 à 60 Hz, il se peut qu'on dépasse alors la puissance disponible du moteur. Lors du phénomène inverse, passage de 60 à 50 Hz, le débit d'air diminue.

6.1.3 Réseau de distribution électrique

Le problème de la perturbation des réseaux par les harmoniques est abordé aux paragraphes 6.5.2 « régulation par modification du glissement » et 6.5.3 « convertisseurs de fréquence ».

Pour les petits entraînements, pour lesquels on choisit souvent, pour des raisons d'économie, des moteurs à courant alternatif monophasé, il faut veiller à maintenir l'équilibre entre les trois phases du réseau.

Résumé

- Malgré leur bonne qualité, les petits moteurs utilisés pour l'entraînement de ventilateurs ne dépassent pas des rendements de 80 à 90%.
- Les moteurs à rotor extérieur, avec pôles bagués (aussi appelés à spire en court-circuit ou Ferraris) ou à collecteurs, essentiellement utilisés dans les petits ventilateurs (WC, cuisines, ventilateurs de gaines, etc.) ont un rendement nettement inférieur, autour de 30 à 50% moteur seul.
- De nouveaux moteurs à rotor extérieur et à commutation électronique ont été présentés à l'ISH 1993. On peut s'attendre à des améliorations sensibles de rendement grâce à ce système (particulièrement avec une régulation de vitesse correspondante).
- La normalisation actuelle en matière de moteurs est insuffisante dans l'esprit de RAVEL. Chaque fabricant devrait être tenu de déclarer les rendements sur une grande plage de vitesses de rotation et de puissances en charge partielle.

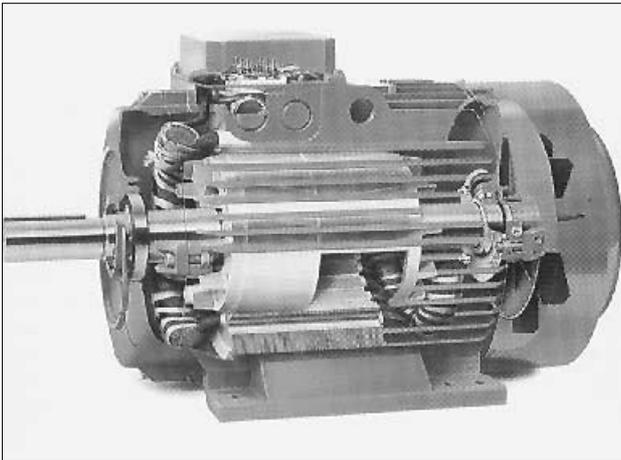


Figure 6.2:
Eclaté d'un moteur triphasé à cage d'écureuil [6.2]
(degré de protection IP 54).

6.2 Moteurs électriques (moteurs asynchrones triphasés)

6.2.1 Types de construction

Dans le moteur à cage d'écureuil (triphasé ou monophasé), le rotor est composé d'un cylindre feuilleté muni d'encoches dans lesquelles sont logées des barres, reliées des deux côtés par des couronnes qui les mettent en court-circuit. Pour que le moteur tourne, il faut que la fréquence de rotation du rotor soit plus faible que celle du champ tournant, c'est pourquoi le rotor tourne de façon asynchrone.

Le rendement du moteur dépend pour une part de la place disponible pour monter les bobinages du stator. Ceci explique pourquoi les moteurs à plusieurs enroulements séparés (deux ou trois vitesses) ont des rendements plus faibles.

Les moteurs à rotor extérieur sont largement répandus dans le domaine de la ventilation. Comme le bobinage se trouve dans le cœur du moteur, il est en règle générale nécessaire de restreindre sa taille. Le rotor extérieur tourne autour du stator qui lui reste fixe. Ceci présente un avantage pour la construction, car la roue du ventilateur peut être fixée directement sur le moteur.

Ce type de construction a l'avantage de supprimer la courroie de transmission toujours source de pertes d'énergie. Par contre, pour pouvoir diffuser largement ce type de moteurs, il fallait lui adjoindre un système permettant de régler la vitesse de rotation. Ceci est réalisé couramment à l'aide de systèmes de réglage agissant sur le glissement du moteur par réduction de la tension d'alimentation. La plupart de ces systèmes de réglage occasionnent des pertes d'énergie considérables et créent des harmoniques.

De nouveaux développements des moteurs à rotors extérieurs à aimants permanents (aimants permanents dans le rotor) permettent de s'attendre à des améliorations. Différents types de construction de ventilateurs (axial, tangentiel, radial) ont été présentés avec de tels moteurs à l'ISH 1993. Les données techniques devraient être disponibles à partir du printemps 1994.

6.2.2 Normalisation

Pour notre pays, il y a deux organismes internationaux concernés par la publication de normes de moteurs ; à savoir, la CEI (Commission électrotechnique internationale) et le CENELEC (Comité européen de normalisation électrotechnique). Les normes nationales en Europe correspondent en grande partie à celles du CENELEC et de la CEI.

Le respect de ces normes assure l'interchangeabilité, entre différentes marques, de moteurs de hauteur d'axe et de puissance identique.

Il n'existe pas encore de valeurs-limites normées concernant les données électriques telles que rendement, facteur de puissance ($\cos \phi$), couple et glissement. La compétition qui règne actuellement sur le marché permet une certaine normalisation, mais on ne remarque pas encore une tendance assez nette à la recherche de meilleurs rendements.

Actuellement, la dispersion entre bons et moins bons rendements s'étend, pour un moteur de 55 kW à quatre pôles offert sur le marché suisse, entre 85 % et 94 %.

Les moteurs à rotor extérieur avec pôles bagués ou à collecteurs ont un rendement nettement moins bon. Ces moteurs sont très répandus en ventilation. Les catalogues des fabricants ne permettent pas de se faire directement une idée du rendement de tels systèmes. On peut par contre admettre que le rendement global du système moto-ventilateur de ce type de construction se situe autour de 10 à 15 %, malgré la suppression de la transmission par courroie.

Pour améliorer les rendements, il faudrait rendre obligatoire la déclaration des données électriques les plus importantes des moteurs et de leur système de régulation éventuel. Il est également très important de prendre en considération les rendements résiduels à charge partielle. Des discussions ont actuellement lieu dans le cadre de la confédération à ce sujet.

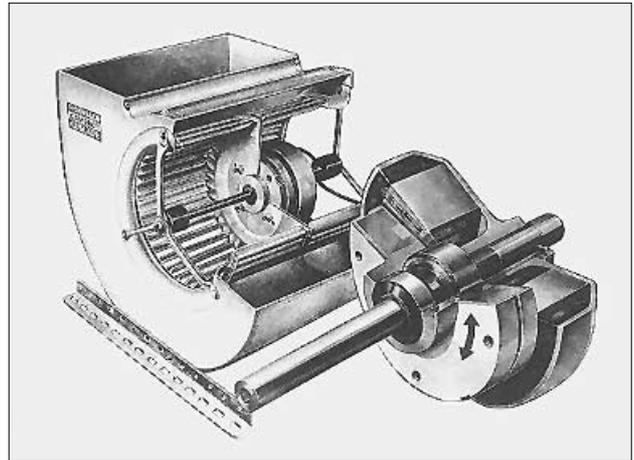


Figure 6.3:
Ventilateur compact avec régulation de vitesse par modification du glissement.

Hauteur d'axe [mm]	Puissance nominale [kW] Moteurs à cage d'écureuil	
	IP 54	IP 23
	0,06	
56	0,09	
63	0,12	
63	0,18	
71	0,25	
71	0,37	
80	0,55	
80	0,75	
90S	1,1	
90L	1,5	
100L	2,2	
100L	3	
112M	4	
132S	5,5	
132M	7,5	
160M	11	11
160L	15	15
160L	—	18,5
180M	18,5	22
180L	22	30
200M	—	—
200L	30	37
225S	37	45
225M	45	55

Tableau 6.1: Grandeurs caractéristiques de moteurs normalisés à quatre pôles [6.2].

6.2.2.1 Grandeur, puissance nominale et degré de protection

La classification des moteurs est effectuée en fonction de la hauteur d'axe, d'un indice (S, M, L) décrivant la longueur de l'exécution et de la puissance nominale qui dépend elle encore du degré de protection.

Suivant la publication CEI 34-5, le degré de protection est indiqué par l'abréviation IP (International Protection) suivie de deux chiffres caractéristiques, par exemple IP 54 :

- Premier chiffre: protection contre les contacts accidentels et l'introduction de particules solides.
- Deuxième chiffre: protection contre l'introduction de particules liquides.

Les degrés de protection utilisés habituellement dans les installations du bâtiment sont résumés dans le tableau 6.2.

Moteur	Degré de protection	1 ^{er} chiffre contre les contacts accidentels	contre l'introduction de particules solides	2 ^e chiffre contre l'introduction de particules liquides	
Refroidissement interne	IP 21	contact avec les doigts	corps étranger de taille moyenne d > 12mm	eau en gouttelettes, verticales	
	IP 22			eau en gouttelettes, obliques jusqu'à 15°	
	IP 23			eau en pluie, jusqu'à 60°	
Refroidissement en surface	IP 44	protection totale contre les contacts accidentels	petites particules solides d > 1mm	projections d'eau de toutes les directions	
	IP 54			contre les dépôts nuisibles de poussière	projections d'eau de toutes les directions
	IP 55				jets d'eau de toutes les directions
	IP 65			étanche à l'entrée de poussière	jets d'eau de toutes les directions
	IP 67				protection en cas d'immersion

Tableau 6.2: Degré de protection de moteurs.

6.2.2.2 Système de refroidissement, classe d'isolation et choix de la grandeur du moteur

Le système de refroidissement nécessaire et la charge admissible dépendent de la classe d'isolation du moteur et de paramètres extérieurs tels que l'altitude du site et la température environnante.

Le type de refroidissement est défini par les deux lettres IC (International Cooling), suivies de deux nombres à un ou deux chiffres.

Le tableau 6.3 contient quelques exemples de systèmes normalisés de refroidissement de moteurs à un seul circuit de refroidissement.

Ces chiffres ont la signification suivante :

- Le premier nombre indique comment le fluide de refroidissement circule.
- Le second nombre indique le type d'entraînement utilisé pour véhiculer le fluide de refroidissement.

Pour les moteurs à deux circuits de refroidissement, la dénomination est un peu plus compliquée. Le tableau 6.4 donne quelques exemples.

Les nombres ont les significations suivantes :

- Le premier groupe formé d'une lettre et de deux chiffres indique le circuit de refroidissement secondaire, extérieur, à basse température.
- Le deuxième groupe, formé aussi d'une lettre et de deux chiffres, indique le circuit de refroidissement primaire, à température plus élevée. La lettre A désigne l'air et la lettre W l'eau. S'il n'y a que de l'air comme médium de refroidissement, on peut supprimer le A.

Les moteurs de construction standard sont prévus pour une utilisation à température ambiante maximale de 40° C et une altitude maximale du site de 1000 m. Tout écart nécessite une correction des puissances nominales.

Lorsque le moteur est exposé à des températures ambiantes différentes de 40° C, on corrige la puissance à l'aide de la formule indiquée ci-après. Le facteur de correction dépend de la classe d'isolation définie selon CEI 85 (indiquée sur la plaque

Type	Description succincte
IC 01	Machine avec entrée et sortie d'air libre, auto-ventilée.
IC 06	Machine avec entrée et sortie d'air libre, ventilateur fixé sur la machine avec entraînement séparé.
IC 11	Machine avec prise pour canal, un canal d'amenée, autoventilée.
IC 17	Machine avec prise pour canal, un canal d'amenée, ventilateur séparé non entraîné par la machine.
IC 21	Machine avec prise pour canal, un canal de sortie, autoventilée.
IC 27	Machine avec prise pour canal, un canal de sortie, ventilateur séparé non entraîné par la machine.
IC 31	Machine avec prise pour canal, un canal d'amenée et un canal de sortie, autoventilée.
IC 37	Machine avec prise pour canal, un canal d'amenée et un canal de sortie, ventilateur séparé non entraîné par la machine.
IC 41	Machine ventilée en surface, autoventilée.
IC 51	Machine avec échangeur incorporé, échangeur refroidi par l'air ambiant, autoventilée.

Tableau 6.3 :
Caractérisation du type de refroidissement pour des moteurs à un circuit de refroidissement.

Type	Description succincte
IC 00 41	Machine ventilée en surface, sans ventilateur.
IC 01 51	Machine avec échangeur incorporé, refroidi par l'air ambiant, autoventilé.
IC 06 41	Machine ventilée en surface, avec ventilateur monté sur le carter, ventilateur non entraîné par la machine.
IC W 37 A 71	Machine refroidie à air avec échangeur incorporé refroidi par eau.
IC W 37 A 81	Machine fermée avec refroidissement air-eau, avec échangeur à eau interchangeable (cassettes).
IC W 37 A 75	Machine avec brassage d'air interne par ventilateur non entraîné par la machine et, échangeur incorporé refroidi par eau.

Tableau 6.4 :
Caractérisation du type de refroidissement pour des moteurs à deux circuits de refroidissement.

Température ambiante t [° C]	Facteur de correction c_t pour la classe d'isolation	
	B	F
30	1,06	1,05
35	1,03	1,02
40	1,00	1,00
45	0,96	0,97
50	0,92	0,94
55	0,87	0,91
60	0,82	0,87

Tableau 6.5:
Facteur c_t pour l'adaptation de la puissance en fonction de diverses températures ambiantes t (altitude du site 1000 m sur mer).

Altitude du site H [m s. mer]	Facteur de correction c_H pour la classe d'isolation	
	B	F
1000	1,00	1,00
1500	0,98	0,98
2000	0,97	0,97
2500	0,93	0,94
3000	0,92	0,93
3500	0,83	0,90
4000	0,78	0,88

Tableau 6.6:
Facteur c_H de réduction de la puissance pour une altitude du site H (température ambiante 40° C).

Altitude du site H [m s. mer]	Température t[° C] ambiante maximale admissible pour une classe d'isolation	
	B	F
1000	40	40
1500	36	35
2000	32	30
2500	28	25
3000	24	20
3500	20	15
4000	16	10

Tableau 6.7:
Température ambiante maximale admissible en fonction de l'altitude du site H, pour la puissance nominale ($c_H = 1$).

signalétique du moteur). Il est ici indiqué pour les classes les plus courantes qui sont B et F.

$$P_M = c_t \cdot P_N$$

- P_M Puissance à température ambiante t
- P_N Puissance nominale du moteur à 40°C
- c_t Facteur de correction pour la température t selon tableau 6.5

Pour une altitude du site de > 1000 m et si la température maximale t est maintenue à 40° C, il faut réduire la puissance du moteur.

$$P_M = c_H \cdot P_N$$

- P_M Puissance du moteur à l'altitude H
- P_N Puissance nominale du moteur à 1000 m d'alt.
- c_H Facteur pour l'altitude du site H, d'après le tableau 6.6.

On peut compenser la diminution de la capacité de refroidissement due à l'altitude, s'il est possible de diminuer la température ambiante maximale à laquelle sont exposés les moteurs.

Pour utiliser pleinement la puissance nominale des moteurs ($c_H = 1$), il ne faut pas dépasser les températures indiquées dans le tableau 6.7.

Si la puissance absorbée P_L d'une machine est connue, on peut déterminer la puissance nominale P_N du moteur correspondant, à l'aide de la relation suivante, qui tient compte de l'altitude du site, de la température ambiante maximale, et de la classe d'isolation :

$$P_N = \frac{P_L}{c_t \cdot c_H}$$

- P_N Puissance nominale du moteur
- P_L Puissance requise
- c_t Facteur de correction selon tableau 6.5
- c_H Facteur de correction selon tableau 6.6

Lors du choix du moteur, il ne faut pas oublier que c'est la puissance absorbée par la machine qui détermine la puissance délivrée par le moteur et donc aussi la puissance absorbée au réseau. Il faut donc prendre garde à ce que le moteur ait une puissance suffisante pour satisfaire dans toutes les situations les besoins de la machine qu'il entraîne.

Prenons par exemple un ventilateur ayant une puissance absorbée de 12 kW. Le moteur fournira ces 12 kW, indépendamment du fait qu'il soit conçu pour 10 kW ou 15 kW. Un moteur de 10 kW, devant fonctionner à 1000 m d'altitude et 40° C, serait donc toujours surchargé de 20%.

La conséquence directe d'une surcharge du moteur est une augmentation de la température du bobinage. Lorsqu'elle dépasse la température limite prévue qui assure une durée de vie acceptable (30 000 h), la durée de vie de l'isolation diminue. Un dépassement de la température-limite de 8-10 K, diminue la durée de vie de l'isolation d'environ la moitié. Des dépassement de 20 K signifient un raccourcissement de 75%.

Une augmentation de la durée de vie d'un facteur 4 peut être obtenue en prenant le même moteur avec une classe d'isolation F, au lieu B.

6.2.2.3 Dénomination des types de raccords

La publication CEI 34-8 définit la dénomination des différents types de raccords.

Lorsque la plaque signalétique d'un moteur triphasé indique la tension aussi bien pour un couplage en étoile que pour un couplage en triangle, cela signifie que le moteur peut être employé pour par exemple 230 V, mais aussi pour 400 V. A 230 V, le bobinage doit être raccordé en triangle, voir dessin de gauche de la figure 6.4. A 400 V, il est branché en étoile, voir dessin de droite de la figure 6.4.

Les données de la plaque signalétique permettent de calculer le rendement à la puissance nominale de la façon suivante :

$$\eta = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}$$

η	Rendement [-]
P	Puissance [W]
U	Tension [V]
I	Courant [A]
$\cos \varphi$	Facteur de puissance

La figure 6.5 montre un exemple d'une plaque. Les données de cet exemple permettent de calculer le rendement suivant :

$$\eta = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 8,1 \cdot 0,9} = 0,79$$

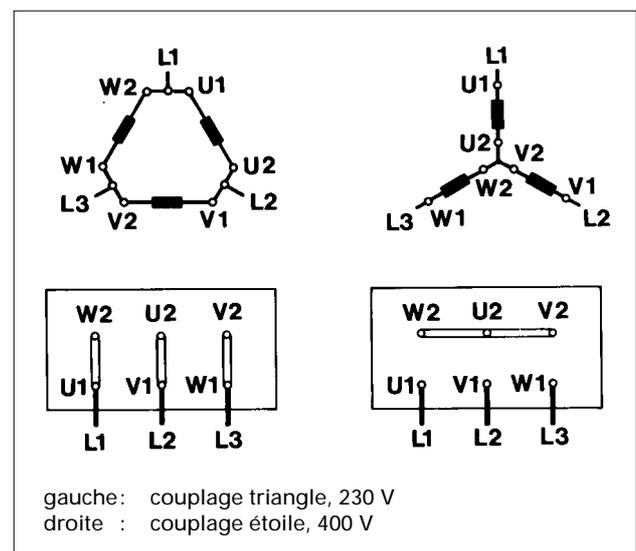


Figure 6.4: Schéma de raccordement des bobinages et du bornier pour commutation étoile-triangle.

Motor 3 ~	50/60 Hz	IEC 34-1
MET 112 M		2860/3460 r/min
4/4.6 kW	Cl. F	$\cos \varphi = 0.90$
380-420/440-480 V Y		8.1/8.1 A
220-240/250-280 V Δ		14.0/14.0 A
No MK 142031-AS	IP 55	30 kg

Figure 6.5: Exemple d'une plaque signalétique.

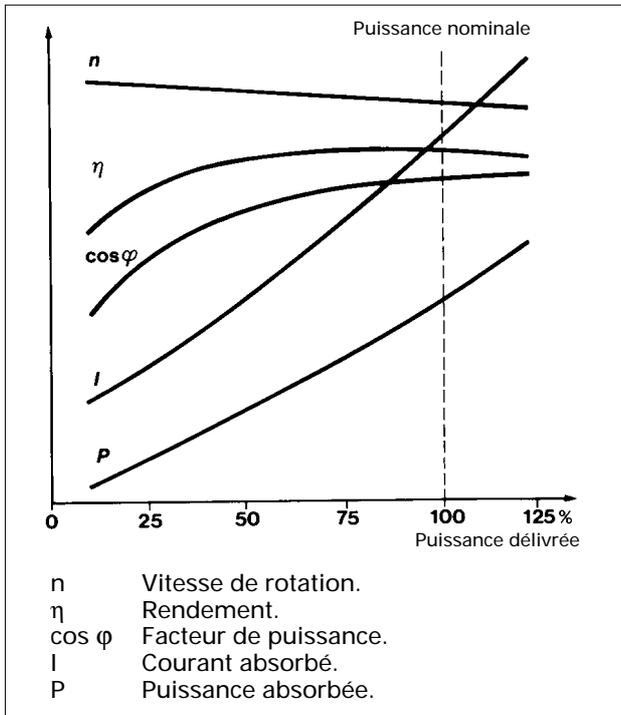


Figure 6.6: Déroulement qualitatif des valeurs caractéristiques les plus importantes d'un moteur, en fonction de la puissance délivrée [6.2].

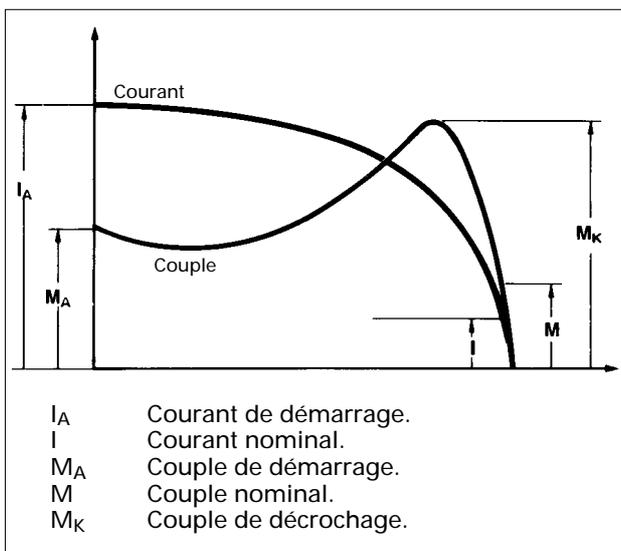


Figure 6.7: Courant et couple d'un moteur triphasé en fonction de la vitesse de rotation [6.2].

6.2.3 Propriétés générales des moteurs à cage d'écureuil

Le chapitre 6.2.2.2 a déjà traité du choix de la puissance pour un moteur électrique. En plus des conséquences d'une surcharge due à l'âge de l'isolation du bobinage, il faut encore tenir compte d'autres facteurs d'influences.

Par exemple, si un moteur est inutilement surdimensionné, il fonctionne sur une mauvaise plage de travail. De plus, le courant de démarrage est inutilement élevé, car il est en partie en rapport avec la taille du moteur. Le déroulement qualitatif des valeurs caractéristiques les plus importantes est montré à la figure 6.6.

6.2.3.1 Caractéristiques de démarrage

Le déroulement qualitatif caractéristique du couple et du courant au démarrage d'un moteur à cage d'écureuil est présenté dans la figure 6.7.

A l'enclenchement, le moteur développe le couple de démarrage, et le courant de démarrage correspondant. Pendant la phase d'accélération, le courant diminue pour atteindre le courant nominal si le fonctionnement est à charge nominale. La valeur du couple de rotation maximum (couple de décrochage) est une mesure de la capacité de surcharge possible du moteur, surcharge qui ne peut toutefois être sollicitée que pendant une courte durée pour des raisons thermiques.

L'accélération correcte du moteur jusqu'à la vitesse de rotation nominale n'est possible que si le couple résistant de la machine entraînée est à tout moment plus petit que le couple moteur disponible. Au couple de charge momentané de la machine, s'additionnent, au cours du processus d'accélération, les masses en rotation des deux machines, ce qui a une influence sur le temps de démarrage.

Le déroulement caractéristique qualitatif du couple moteur en fonction du couple de charge (résistant) et du couple d'accélération est présenté à la figure 6.8.

Le démarrage provoque un échauffement important du moteur à cause de l'augmentation du courant pendant cette phase.

Le temps de démarrage dépend du moment d'inertie de la masse en mouvement, de la vitesse de rotation finale et du couple d'accélération du moteur.

Les moments d'inertie des ventilateurs ne sont en général pas critiques pour le démarrage des moteurs à cage d'écureuil.

C'est seulement pour quelques gros ventilateurs industriels, qu'il est conseillé, afin de protéger le moteur, de le choisir une ou deux tailles plus grandes, ce qui raccourcit le temps de démarrage. Du point de vue du réseau de distribution, il serait pourtant mieux d'employer un moyen auxiliaire pour un démarrage plus doux (voir paragraphe 6.2.3.2).

Lorsqu'on passe d'une vitesse de rotation élevée à une vitesse réduite, il faut munir les gros ventilateurs d'une temporisation, pour éviter que la petite vitesse n'entre en action alors que le ventilateur tourne encore trop vite, ce qui crée des à-coups dans la transmission.

6.2.3.2 Aides pour le démarrage

Plusieurs modes de démarrage sont disponibles pour adoucir le démarrage. La majorité des distributeurs d'électricité interdisent le démarrage direct de moteurs dont la puissance nominale est supérieure à 3 – 5 kW.

Avec le démarrage étoile-triangle, le moteur, par exemple bobiné pour 400V, est mis en marche avec les bobines commutées en étoile. Pour cela, on monte ensemble une des extrémités de chacune des trois bobines à l'aide d'un contacteur. Les trois autres extrémités sont connectées aux trois phases du réseau. La tension par bobinage est ainsi diminuée d'un facteur racine de 3. Par conséquent, le courant est plus faible et le démarrage plus lent. Après un certain temps, on commute les bobines en triangle et le moteur fonctionne avec sa tension nominale et son courant nominal jusqu'à ce que couple moteur et couple résistant s'équilibrent pour établir le point de fonctionnement.

La pointe de courant qui survient au passage étoile/triangle n'est toutefois pas beaucoup plus petite que pour un démarrage direct. Sa durée est par contre beaucoup plus courte.

On peut sans problème assurer un démarrage doux si on prévoit une régulation de vitesse du moteur ou une variation de la fréquence.

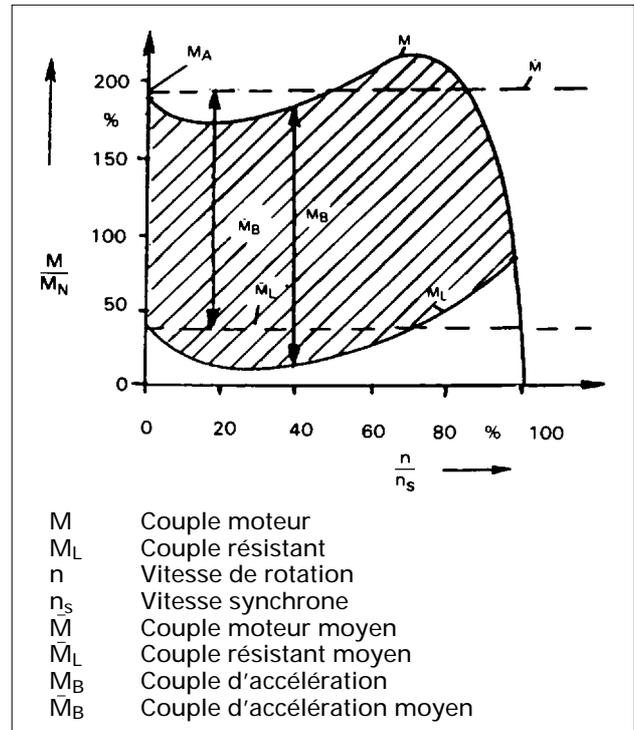


Figure 6.8: Démarrage d'un moteur électrique, rapport entre le couple de charge M et le couple résistant M_L d'un ventilateur [6.3].

Nombre de paires de pôles	Vitesse de rotation synchrone [min ⁻¹] à	
	50 Hz	60 Hz
1	3000	3600
2	1500	1800
3	1000	1200
4	750	900
5	600	720
6	500	600

Tableau 6.8: Vitesses de rotation synchrones.

6.2.3.3 Vitesse de rotation

La vitesse de rotation d'un moteur triphasé dépend de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles.

$$n = \frac{f \cdot 60}{p}$$

- n Vitesse de rotation [min⁻¹]
- f Fréquence du réseau [Hz, s⁻¹]
- p Nombre de paires de pôles [-]

A vide, le moteur asynchrone atteint presque la vitesse de rotation synchrone. A la puissance nominale, cette vitesse est légèrement inférieure du fait du glissement.

Le glissement s'obtient par l'équation suivante :

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

- s Glissement
- n₁ Vitesse de rotation synchrone
- n Vitesse de rotation asynchrone

Le glissement varie proportionnellement à la charge.

Exemple

Moteur à 4 pôles, 4 kW, 380 V, 50 Hz, 1425 min⁻¹

$$s \text{ à } 4 \text{ kW} = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0,05$$

ce qui correspond à 1500 - 1425 = 75 min⁻¹

$$s \text{ à } 3 \text{ kW} = \frac{3}{4} \cdot (1500 - 1425) = 56 \text{ min}^{-1}$$

n à 3 kW est donc de 1500 - 56 = 1444 min⁻¹

Exemple

Moteur à 4 pôles, 4 kW, 380 V, 50 Hz, 1425 min⁻¹
Tension de raccordement 346 V, 50 Hz

$$s \text{ à } 346 \text{ V} = \left(\frac{380}{346}\right)^2 \cdot \frac{1500 - 1425}{1500} = 0,06$$

ce qui correspond à $\left(\frac{380}{346}\right)^2 \cdot (1500 - 1425) = 90 \text{ min}^{-1}$

n est donc de 1500 - 90 = 1410 min⁻¹

Le glissement est inversement proportionnel au carré de la tension.

6.2.3.4 Rendement du moteur

Le rendement d'un moteur électrique est fortement influencé par la puissance développée. Cela signifie que le rendement atteignable augmente avec la puissance du moteur.

La figure 6.9 montre l'évolution du rendement à puissance nominale de moteurs à cage d'écureuil, d'abord en fonction de la hauteur d'axe (plusieurs puissances possibles pour la même hauteur d'axe), ensuite en fonction de la puissance.

Au vu des rendements indiqués, il apparaît que même le moteur à cage d'écureuil monophasé a des rendements encore meilleurs que les moteurs à rotor en disque ou à rotor extérieur.

On voit ainsi, que le fait de pouvoir régler la vitesse des moteurs à rotor en disque ou à rotor extérieur, par un réglage de tension simple, n'est pas la bonne solution, car il faudrait d'abord améliorer les rendements à charge nominale avant de régler la vitesse.

Il faut également se méfier des rendements maximums indiqués sans les rendements à charge partielle pour plusieurs points de fonctionnement différents.

En appliquant les mesures suivantes, on devrait pouvoir améliorer le rendement des moteurs futurs :

- Réduction des pertes du bobinage du stator en augmentant la section du cuivre.
- Réduction des pertes dans le fer du stator en utilisant des aciers de meilleure qualité.
- Meilleure ventilation.
- Amélioration des roulements et du graissage.

Une diminution de la résistance du rotor par de plus grandes sections, est limitée par la modification de la caractéristique du couple de rotation.

On n'a pas mentionné les pertes « supplémentaires », qui sont aussi les plus difficiles à cerner. Elles représentent 10 à 20% des pertes globales, et dépendent essentiellement des tolérances de finitions.

Nouveautés sur le marché des moteurs

Au printemps 1993, dans les foires spécialisées, on a vu apparaître un nouveau concept de moteur

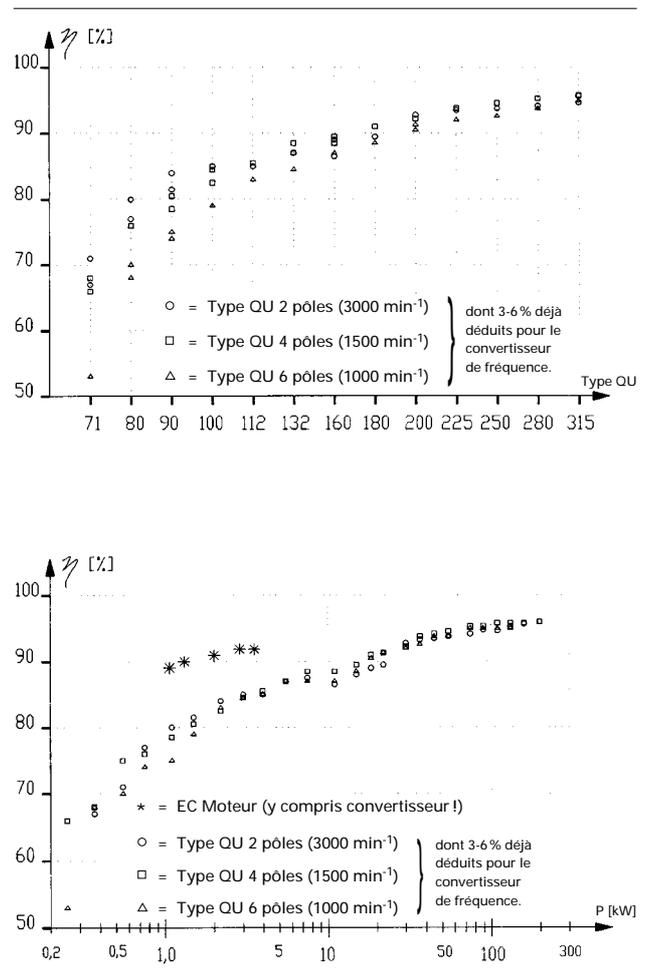


Figure 6.9: Rendement à charge nominale en fonction de la taille (haut), respectivement de la puissance nominale (bas).

pour des puissances jusqu'à 5 kW : le moteur (EC) à commutation électronique. Il s'agit d'un moteur à collecteurs, respectivement d'un moteur à courant continu sans balais (brushless DC-motor) qui a un très bon rendement même pour de petites puissances.

Comme il existe à ce jour encore peu de données, on a inclus quelques points caractéristiques dans la figure 6.9.

Dans les publications, on explique l'amélioration sensible du rendement du moteur EC par la suppression des pertes de glissement, des pertes d'excitation et la diminution des pertes dans le cuivre.

Les moteurs EC peuvent aussi bien être construits avec rotor intérieur qu'avec rotor extérieur. Les moteurs EC à rotor extérieur seraient, par leur compacité, bien indiqués dans la fabrication de ventilateurs. Ils peuvent être montés directement dans la roue du ventilateur. On peut ainsi supprimer la transmission par courroie tout en ayant de bons rendements.

6.2.3.5 Le facteur de puissance

Le moteur à induction ne tire pas seulement du réseau, de la puissance active qu'il transforme en travail mécanique, mais aussi de la puissance réactive nécessaire à l'excitation, mais avec laquelle il ne fournit pas réellement du travail.

Le courant nécessaire pour la puissance réactive s'additionne au courant de la puissance active, et augmente la charge du réseau de distribution.

La puissance active et la puissance réactive sont représentées dans la figure 6.10 par les vecteurs P et Q ; ils déterminent la puissance apparente. Le rapport entre la puissance active mesurée en kW et la puissance apparente mesurée en kVA est le facteur de puissance. L'angle entre P et S s'appelle phi, la valeur du rapport est donc $\cos \varphi$.

Suivant la taille du moteur et le nombre de pôles, la valeur de $\cos \varphi$ se trouve entre 0,6 (pour petits moteurs et nombre de pôles élevés) et 0,9 (pour grands moteurs et petit nombre de pôles). Le facteur de puissance peut aussi être mesuré ; pour cela voir le paragraphe 6.3.

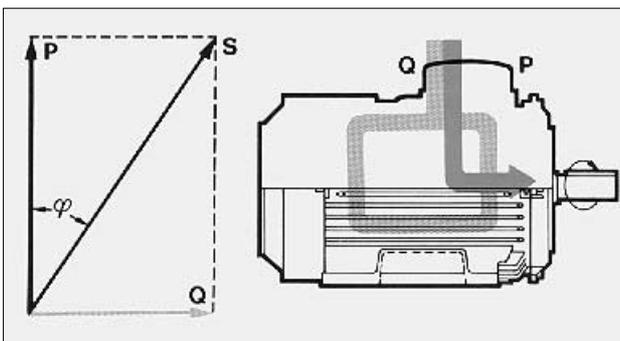


Figure 6.10 :
Puissance active P et puissance réactive Q [6.2].

6.3 Mesure de la puissance

Dans la pratique, la puissance absorbée d'un moteur peut être déterminée à l'aide des méthodes suivantes :

- Lire l'énergie consommée par le compteur, en kWh, à 2 moments différents, puis la diviser par le temps qui s'est écoulé entre les deux mesures.

Exemple :

Temps de lecture 1/2 heure
 Différence relevée 10 kWh
 Puissance 10 kWh/0,5 h = 20 kW

- Mesure du courant dans un conducteur en insérant un ampèremètre dans le circuit ou à l'aide d'une pince ampèremétrique, et mesure de la tension.

La puissance absorbée s'exprime alors par :

$$P = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi$$

P	Puissance active [W]
I	Courant [A]
U	Tension [V]
cos φ	Déphasage entre U et I [-]
$\sqrt{3} \cdot I \cdot U = S$	Puissance apparente [VA]

Attention :

Lorsqu'on mesure avec une pince ampèremétrique, il faut bien prendre garde à ne mettre qu'un conducteur dans le transformateur d'intensité. Dans les moteurs utilisés en ventilation, la charge triphasée est en général suffisamment équilibrée, pour qu'il suffise de mesurer une phase. Les autres ont un flux identique, seulement décalé de 120°. La puissance calculée ci-dessus à l'aide des mesures effectuées sur une seule phase est la puissance totale absorbée par le moteur.

Alors que la puissance apparente est le produit des mesures de tension et de courant, $\cos \varphi$ est le rapport entre la puissance active P (mesurée avec le wattmètre) et la puissance apparente $S = \sqrt{3} \cdot I \cdot U$.

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot I \cdot U}$$

Résumé

- La mesure est la plus simple à effectuer lorsque le moteur est équipé d'un compteur d'énergie individuel.
- Lorsque le facteur de puissance $\cos \varphi$ d'un moteur est connu, on peut alors calculer sa puissance active à partir des mesures de tension et de courant.
- On peut déterminer le facteur de puissance à l'aide d'un wattmètre, d'un ampèremètre et d'un voltmètre.

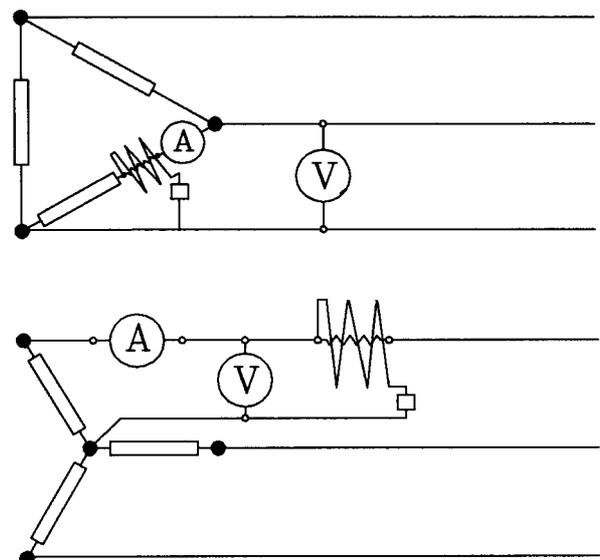


Figure 6.11 : Principe de mesure de la puissance pour couplage en triangle et en étoile.

Résumé

- Le système de transmission le plus répandu en ventilation est l'entraînement par courroie trapézoïdale.
- La supériorité des courroies plates est encore controversée. Leur rendement est probablement meilleur de 1 à 2%.
- Les entraînements directs sont les meilleurs, car ils évitent les pertes par transmission.

6.4 Transmission

L'entraînement à courroie trapézoïdale est très répandu en technique de ventilation, car il permet d'adapter facilement la vitesse de rotation du ventilateur à la perte de charge du réseau. Cela se fait par échange de poulie ou réglage de l'écartement des joues des poulies réglables (la courroie ne doit pas appuyer sur le fond de la poulie).

Le type de courroie le plus répandu est la courroie trapézoïdale étroite. La courroie striée entre en ligne de compte pour des puissances plus grandes ; elle est formée de plusieurs courroies jointes par une bande vulcanisée.

L'erreur la plus fréquente est de mettre en parallèle deux courroies ou même plus, là où une seule suffirait, avec pour conséquences, une usure irrégulière qui provoque des bruits dus aux vibrations, une détérioration plus importante de l'une ou l'autre des courroies, une durée de vie réduite et une diminution du rendement de transmission.

Pour l'instant, les courroies plates ont la réputation d'avoir un meilleur rendement pour de grands entraînements. Une étude effectuée au technicum de Windisch pour le compte de l'OCF a démontré que, sur des ventilateurs usuels, la transmission n'était meilleure que de 1% [6.5].

Alors qu'avec des courroies trapézoïdales bien réglées, on peut compter sur un rendement de 96 à 97%, celui de courroies plates bien réglées est de 97 à 98%.

Avec de petits diamètres de poulies et en fonctionnement à vitesse réduite, le rendement des courroies trapézoïdales diminue jusqu'à 80%.

La courroie plate est nettement avantageuse lorsqu'on prend en compte le bruit, les vibrations et l'usure. Les inconvénients de la courroie plate sont, à part un prix de plus de 50% plus élevé, le fait que les roulements des paliers sont plus sollicités, du fait de la tension que nécessite ce genre de courroies. En particulier, les roulements des moteurs modernes ne sont pas toujours adaptés à ces exigences accrues.

Des entraînements à courroies trapézoïdales munis de poulies trop petites, ou inutilement de courroies doubles et dont la tension est mal réglée entraînent des pertes de 10 à 20%. Malheureusement, de tels cas se rencontrent encore souvent aujourd'hui.

Il est clair, dans le sens de RAVEL, qu'ici de nettes améliorations sont encore nécessaires !

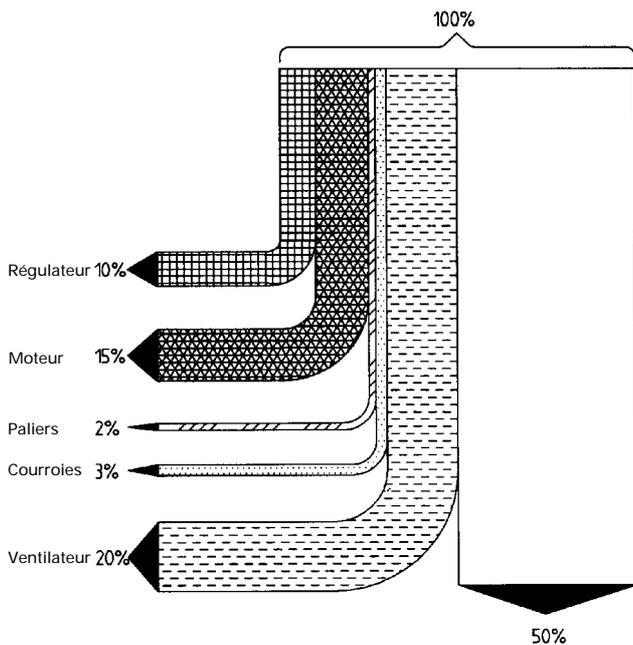


Figure 6.12: Synoptique des pertes d'un système moto-ventilateur complet (plage de puissance 3 kW) [6.6].

6.5 Régulation de la vitesse de rotation

Les différentes possibilités de régulation de pression et de débit d'air des ventilateurs ont été présentées au chapitre 5.5. La nécessité de pouvoir régler la vitesse du ventilateur et donc du moteur est de plus en plus actuelle, du fait de la tendance générale vers une diminution des débits d'air et la demande croissante en installations à débit variable en fonction des besoins.

Le rapport suivant existe entre la fréquence du réseau, le nombre de paires de pôles, le glissement et la vitesse de rotation :

$$n = \frac{f \cdot 60 (1 - s)}{p}$$

n	Vitesse de rotation [min ⁻¹]
f	Fréquence du réseau [Hz, s ⁻¹]
s	Glissement [-]
p	Nombre de paires de pôles [-]

En principe, la régulation de la vitesse de rotation se fait en modifiant soit le nombre de paires de pôles, soit le glissement, soit la fréquence du réseau. En pratique, les trois possibilités sont utilisées.

6.5.1 Modification du nombre de paires de pôles

Il existe trois manières de modifier le nombre de paires de pôles d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil :

Le stator peut être équipé

- avec deux bobinages séparés ou plus ;
- avec un bobinage à nombre de pôles commutable ;
- avec une combinaison des deux solutions ci-dessus.

Théoriquement, les combinaisons de vitesse de rotation sont illimitées. En réalité les possibilités sont pourtant limitées par la place que prennent les bobinages et le grands nombres de paires de pôles nécessaires. C'est pourquoi, dans la pratique, on ne rencontre en général que deux, au

Résumé

- Il est nécessaire de considérer les performances des systèmes de régulation de vitesse de rotation sur toute la plage de travail qu'ils sont appelés à couvrir. Il faut prendre en particulier garde aux performances à pleine charge, pour lesquelles les pertes occasionnées par le système de réglage ne sont pas négligeables.

Nombre de paires de pôles	Vitesse synchrone à 50 Hz [t/min]	Taille du moteur pour P = 15 kW
1	3000	160 M
2	1500	160 L
3	1000	180 L
4	750	200 L
1 + 2	3000/1500	180 M
2 + 3	1500/1000	180 M
3 + 4	1000/750	200 L
2 + 3 + 4	1500/1000/750	200 L
3 + 4 + 5	1000/750/600	225 S

Tableau 6.9: Grandeurs caractéristiques de moteurs à enroulements séparés.

plus trois, bobinages séparés. Pour des raisons de place, on voit rarement un nombre de paires de pôles supérieur à 4 (8 pôles) en combinaison avec d'autres bobinages. Autrement, les moteurs deviendraient trop gros pour une puissance donnée. Pour cette raison, il faudrait plus souvent envisager d'utiliser deux moteurs différents, directement reliés aux deux extrémités de l'arbre du ventilateur.

6.5.1.1 Bobinages séparés

Comme mentionné ci-dessus, la taille croissante du moteur est le facteur limitant les possibilités de combinaisons des différents nombres de paires de pôles.

Les moteurs à deux bobinages séparés utilisés en technique de ventilation peuvent délivrer à la grande vitesse, en première approximation, le 80% de la puissance que pourrait délivrer un moteur de même taille à un seul bobinage, tournant au même régime.

Les combinaisons théoriquement possibles sont résumées dans le tableau 6.9. Lorsque trois vitesses de rotation sont nécessaires, une répartition sur deux moteurs pourrait s'avérer judicieuse.

Le rendement d'un moteur à plusieurs bobinages, fonctionnant à la grande vitesse, est toujours un peu plus faible que le rendement d'un moteur à un seul bobinage délivrant la même puissance et tournant à la même vitesse.

De plus, avec plusieurs bobinages, la vitesse la plus élevée a le meilleur rendement. Pour les autres vitesses le rendement est plus faible, il diminue avec l'augmentation du nombre de pôles (voir 6.5.4).

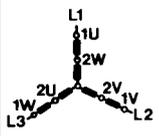
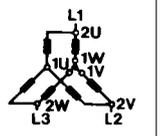
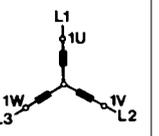
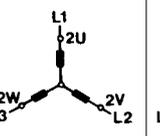
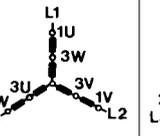
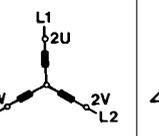
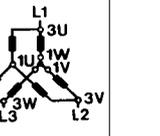
6.5.1.2 Bobinages à nombre de pôles commutables

Il existe plusieurs possibilités de rendre un bobinage commutable et obtenir ainsi une meilleure utilisation de la taille du moteur. Par souci de simplicité du système de commutation, on utilise en pratique soit le couplage Lindström-Dahlander ou le couplage à modulation d'amplitude de pôle (PAM).

Le couplage Dahlander permet un rapport de nombre de paires de pôles de 1:2. Le couplage

PAM autorise d'autres possibilités et permet une meilleure utilisation de la taille du moteur.

Pour les entraînements de ventilateurs, les parties des bobinages sont connectées comme le montre la figure 6.13.

Couple pour ventilateur	Moteur à deux vitesses et				Moteur à deux vitesses et		
	1 bobinage ¹⁾		2 bobinages		2 bobinages ²⁾		
	Vitesse		Vitesse		Vitesse		
	basse	élevée	basse ³⁾	élevée ³⁾	basse	moyenne ³⁾	élevée
							

¹⁾ Couplage Dahlander ou PAM.

²⁾ Par exemple pour 8/6/4 pôles. Un des bobinages est couplé en Dahlander ou PAM.

³⁾ Le bobinage peut aussi être couplé en triangle.

Figure 6.13:

Exemples de possibilités de bobinages et de couplages pour différentes constructions de moteurs, à plusieurs vitesses de rotation [6.2].

6.5.2 Régulation par modification du glissement

Pour augmenter le glissement d'un moteur, il faut augmenter l'écart entre le champ magnétique tournant et la vitesse de rotation du moteur. Le principe de base, commun à tous ces systèmes est de faire chuter la tension par un moyen ou un autre afin de réduire la vitesse (voir également chiffre 6.2.3.3), la fréquence et le nombre de pôles restants identiques.

Les familles de systèmes les plus utilisés sont les suivants:

- moteurs à bagues avec résistances auxiliaires (pas utilisé en ventilation, en tout cas de nos jours);
- transformateurs/autotransformateurs;
- hachage de phase par triacs/thyristors.

La grande majorité des systèmes utilisés en ventilation relèvent des deux dernières techniques mentionnées et équipent, dans la plupart des cas, de petits ventilateurs seulement.

Le couple moteur est en relation quadratique avec la tension.

La régulation par glissement est donc plus ou moins acceptable dans le cas de ventilateurs parce que le couple résistant se réduit quadratiquement avec la réduction de vitesse.

Le système de réglage par hachage de phase crée des harmoniques qui non seulement perturbent le fonctionnement du moteur, mais polluent le réseau de distribution. Le réglage par transformateur ne crée par contre pas d'harmoniques.

Le prix est le principal avantage de ces systèmes de régulation.

Les systèmes par transformateurs permettent une adaptation du régime par paliers, alors que les systèmes à hachage de phase autorisent un réglage progressif continu. Il faut toutefois prendre garde à ne pas démarrer sur un petit régime au risque de détruire le moteur.

Les performances énergétiques de ces systèmes ne sont pas bonnes (voir chapitre 6.5.4), quoique quand même préférables à par exemple une régulation par étranglement ou by-pass.

6.5.3 Convertisseurs de fréquence

La régulation de vitesse la plus favorable du point de vue consommation d'énergie, dans le cas de ventilateurs ou pompes, est celle obtenue avec un convertisseur de fréquence.

La figure 6.14 montre la variation de la courbe caractéristique du couple moteur/vitesse de rotation pour différentes fréquences, rapport tension sur fréquence maintenu constant. On voit que dans ce cas le couple reste constant.

Comme le couple résistant d'un ventilateur (ou d'une pompe) diminue avec le carré de la vitesse, les fabricants de convertisseurs ont prévu la possibilité de programmer l'appareil pour que le rapport tension/fréquence ne diminue pas linéairement avec la réduction de la fréquence de sortie, mais selon une courbe quadratique (souvent plusieurs à choix), ce qui permet de surexciter le moteur (également appelé sous-magnétisation). Ainsi, la tension diminue plus que proportionnellement, ce qui réduit les pertes et explique pourquoi le rendement du système convertisseur-moteur reste bon en charge partielle dans le cas

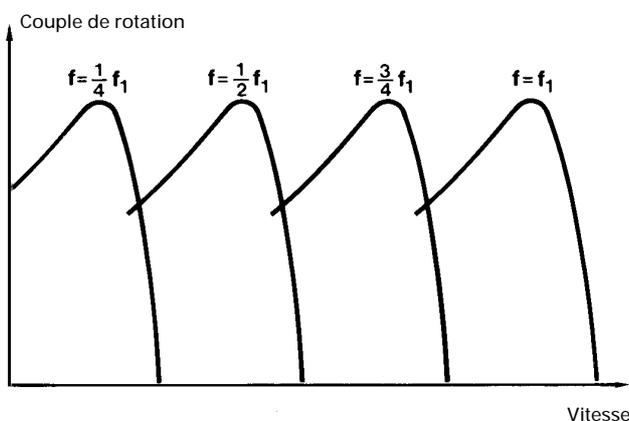


Figure 6.14 :
Exemple de courbes caractéristiques du couple moteur pour différentes fréquences, rapport tension sur fréquence = constante [6.2].

d'une application ventilation ou pompes. Ces résultats ne sont pas transposables aux machines à couple constant, ou couples de démarrage importants tels que ascenseurs, etc.

Le rendement du convertisseur reste très bon sur toute la plage de fréquences, dans le cas d'une application à couple résistant quadratique. Les pertes sont typiquement admises entre environ 3% et 6% (voir figures 6.9).

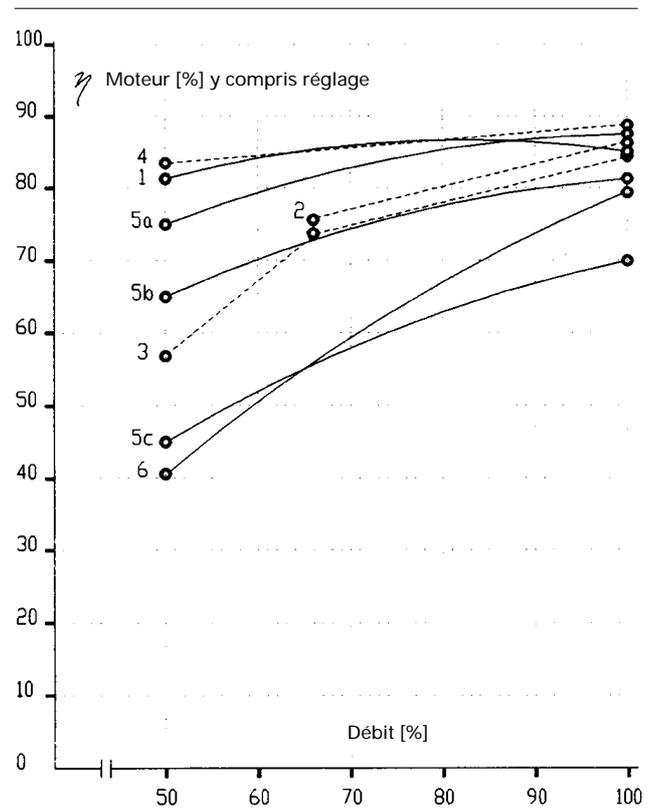
Lorsque le ventilateur est arrêté, il vaut la peine de mettre également hors service le convertisseur, de manière à supprimer les pertes de veille qui deviennent non négligeables lorsqu'on considère la consommation annuelle.

Il est nécessaire de préciser au préalable au fournisseur du moteur qu'un réglage par convertisseur est prévu.

Pour ceux qui s'intéressent de plus près au fonctionnement d'un convertisseur, il existe un livre édité par Danfoss [6.8] qui traite de ce sujet.

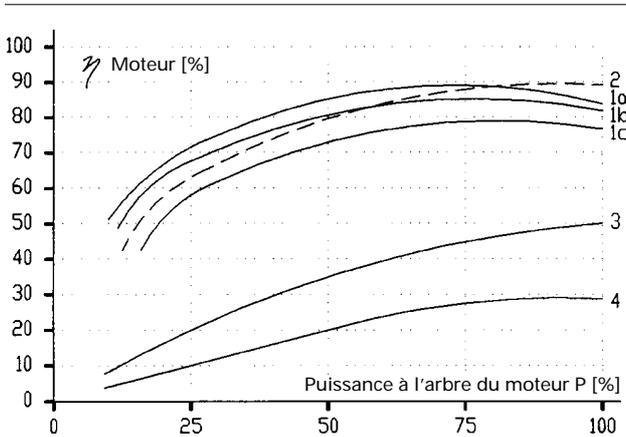
6.5.4 Modification du rendement

Suivant le type de régulation de la vitesse, respectivement du débit, le déroulement qualitatif du rendement du moteur se présente comme dans la figure 6.15.



- 1a Moteur normalisé triphasé, exécution normale 4 kW, réglage par clapet d'étranglement.
 - Attention: le rendement global se réduit à environ 15% à 50% du débit.
- 2 Moteur à pôles commutables à 2 enroulements séparés de 6/8 pôles.
- 3 Moteur à pôles commutables à 3 enroulements séparés de 4/6/8 pôles.
- 4 Moteur à pôles commutables à un seul enroulement 4/8 pôles (couplage Dahlander).
- 5a Moteur normal y compris convertisseur de fréquence, puissance nominale 15 kW.
- 5b Moteur normal y compris convertisseur de fréquence, puissance nominale 4 kW.
- 5c Moteur normal y compris convertisseur de fréquence, puissance nominale 1,1 kW.
- 6 Moteur spécial pour régulation par glissement (hachage de phase ou transfo), puissance nominale 4 kW.

Figure 6.15: Evolution qualitative du rendement du moteur en fonction de la vitesse de rotation.



1a	Moteur normalisé, triphasé, exécution normale	15,0 kW
1b	Moteur normalisé, triphasé, exécution normale	4,0 kW
1c	Moteur normalisé, triphasé, exécution normale	1,1 kW
2	Moteur normalisé, triphasé, exécution à haut rendement	15,0 kW
3	Moteur asynchrone monophasé avec condensateur auxiliaire	0,2 kW
4	Moteur à pôles bagués	0,2 kW

Figure 6.16 : Evolution du rendement du moteur en fonction de la puissance délivrée à l'arbre, moteurs à 4 pôles et de différents types de construction.

La figure 6.16 montre le déroulement du rendement du moteur en fonction de la puissance délivrée à l'arbre du moteur, pour un moteur à 4 pôles et différents types de construction (vitesse de rotation constante au glissement près).

6.6 Protection contre les explosions

Il existe des ordonnances particulières pour l'utilisation d'appareils électriques dans des installations où existe un risque d'explosion dû à des mélanges de gaz explosifs, des produits explosifs ou des poussières inflammables.

Pour les moteurs électriques, il y a deux principes généraux pour la protection contre les explosions. Premièrement, on peut construire le moteur de telle sorte qu'il ne puisse pas se produire de chaleur dangereuse ou d'étincelles. Cette construction correspond au type de protection EEx e, dit à sécurité augmentée. Deuxièmement, on peut isoler le moteur de telle façon que la chaleur ou les étincelles ne puissent pas enflammer des mélanges de gaz qui se trouvent à l'extérieur. Cette façon de faire correspond aux types de protection EEx d, dit à enveloppe antidéflagrante et EEx p, dit à surpression interne.

6.7 Acoustique

Les valeurs-limites pour la tolérance de bruit des moteurs sont données par les directives VDE 0530. Dans certains cas particuliers il est nécessaire de rechercher ces informations dans les données techniques des fabricants. La figure 6.17 donne en exemple, les indications fournies par ABB pour des moteurs à cages d'écureuil, fermés avec ventilation extérieure, du type QU, degré de protection IP 54.

Le choix de la vitesse de rotation du moteur joue un rôle essentiel pour le niveau de bruit. Les valeurs figurant dans le tableau 6.10 sont tirées de données ABB :

Pour des exigences plus élevées, on peut utiliser d'autres variantes de refroidissement, qui peuvent apporter une réduction sensible du bruit.

L'utilisation de moteurs silencieux peut, dans certains cas, permettre la suppression de l'amortisseur de bruit.

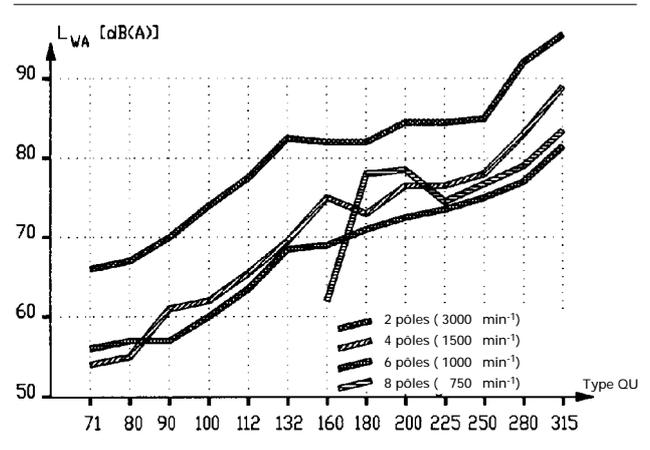


Figure 6.17:
Bruit typique de moteurs [6.1].

Puissance [kW]	Vitesse [min ⁻¹]	Type QU	L _{WA} [dB(A)]	η [%]
15	3000	160 M2	82,0	88,0
15	1500	160 L4	75,0	89,5
15	1000	180 L6	71,0	88,5
15	750	200 L8	78,5	91,0

Tableau 6.10:
Données caractéristiques de moteurs ABB [6.1].

Bibliographie chapitre 6

- [6.1] ABB Elektromotoren GmbH
Drehstrommotoren für Niederspannung
Broschüre DE EMO/B10-4002 DE, 1992-05
- [6.2] ABB Motors
Der Drehstrommotor
Broschüre A10-2004 T, 1989-01
- [6.3] ABB Normelec AG
Drehstrom-Asynchronmotoren
Grundlagen und Dimensionierung
- [6.4] Office fédéral des questions conjoncturelles
Manuel RAVEL
L'électricité à bon escient
ISBN 3-905233-12-6, 1993
- [6.5] HTL Brugg-Windisch
Vergleichende Untersuchung zwischen Keilriemen und Hochleistungsflachriemen
Info Energie, 1989
- [6.6] G. Häusermann, Ziehl Abegg GmbH
Energiesparpotential bei Ventilatoren
Symposium RLT-Geräte, 4. September 1991, Essen
- [6.7] M. Jeanrenaud
Electrotechnique, lois générales et machines
Editions André Delcourt, Lausanne, 1987
ISBN 2 -88161 -005 -6
- [6.8] Danfoss
L'essentiel sur les variateurs de vitesse
1^{er} tirage, édition 1991
A commander en Suisse auprès de Werner Kuster SA

7 Aide-mémoire

A1	Aide-mémoire pour la conception du bâtiment	141
	S'assurer dès que possible le concours d'un ingénieur spécialisé en installations techniques du bâtiment	141
	Optimisation de la forme et de l'orientation du bâtiment ainsi que de la taille des fenêtres	141
	Bonne isolation thermique et bonne étanchéité de l'enveloppe du bâtiment.	141
	Grande capacité d'accumulation thermique de la construction	141
	Choix de matériaux de construction et d'aménagement intérieur, pauvres en émissions polluantes	142
	Protection solaire efficace	142
	Séparation des zones à usage différent	142
	Concept de protection antifeu	142
	Disposition et surfaces nécessaires pour les installations techniques du bâtiment	143
	Concept d'éclairage	143
	Utilisation de la lumière du jour	143

A2	Aide-mémoire pour la conception des installations de ventilation et de climatisation	144
	Détermination claire des bases et des conditions de garantie	144
	Amenée d'air frais en fonction des besoins	144
	Puissance thermique et de refroidissement	144
	Sources internes de chaleur	144
	Sources locales de chaleur, polluants, humidité	144
	Circulation de l'air dans le local	145
	Free-cooling	145
	Utilisation des rejets thermiques	145
	Utilisations différenciées	145
	Registre terrestre à air	145
	Sonde géothermique	145
	Concept de mesures	145

A3	Aide-mémoire pour la conception de composants particuliers	146
	Faible puissance pour le transport de l'air	146
	Bon rendement des ventilateurs	146
	Récupération de chaleur	147
	Humidification	147
	Machines de production de froid	147
	Conduites pour le fluide frigorigène et pour l'eau glacée	147

A4	Aide-mémoire pour l'exploitation des équipements	148
	Adapter la température ambiante aux besoins	148
	Adapter l'humidité ambiante aux besoins	148
	Adapter le mode et l'horaire d'exploitation aux besoins	148
	Utilisation rationnelle de la protection solaire en hiver	148
	Eviter les charges thermiques inutiles en été	149
	Contrôle régulier et entretien	150
	Comptabilité énergétique	150
	Optimisation de l'installation	150

A1

Aide-mémoire pour la conception du bâtiment

S'assurer dès que possible le concours d'un ingénieur spécialisé en installations techniques du bâtiment

Pour garantir l'intégralité de la conception et la prise en compte des interactions entre bâtiment et installations, il est justifié de s'assurer le concours d'un ingénieur spécialisé en installations techniques du bâtiment, ou éventuellement d'un conseiller en énergie.

La pratique a montré que les éventuels coûts supplémentaires qui en résultent, sont en général largement couverts par les économies sur les coûts d'investissement et de fonctionnement.

Voir aussi paragraphe 4.1.

Optimisation de la forme et de l'orientation du bâtiment ainsi que de la taille des fenêtres

Il faut optimiser la forme et l'orientation du bâtiment, ainsi que la taille des fenêtres, en fonction de l'orientation des façades. Pour cela, il faut tenir compte de la protection thermique estivale et hivernale, comme de l'utilisation du rayonnement solaire en hiver.

Voir aussi paragraphes 4.1, 4.2.

Bonne isolation thermique et bonne étanchéité de l'enveloppe du bâtiment

Pour tous les bâtiments neufs et pour les locaux refroidis de bâtiments anciens, la protection thermique estivale et hivernale doit répondre aux exigences de la norme SIA 180, et satisfaire au minimum aux valeurs-limites de la recommandation SIA 380/1. Pour des installations énergétiquement très performantes, il faut viser les valeurs-cibles.

Il faut aussi accorder une attention particulière aux exigences en matière d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment selon l'annexe 7 de SIA 180. Un bâtiment équipé d'installations de ventilation et climatisation, devrait être aussi étanche que possible.

Voir aussi paragraphes 3.2, 4.1, 4.5.

Grande capacité d'accumulation thermique de la construction

Afin que les locaux refroidis puissent profiter de la capacité d'accumulation thermique de la construction, il faut pour le moins une classe de construction moyennement lourde, avec une masse spécifique d'accumulation du local de $m > 350 \text{ kg/m}^2$ de surface au sol, selon SIA V382/2, chiffre 5.2. Pour une installation énergétiquement très performante, il est souhaitable de prendre $m > 400 \text{ kg/m}^2$. Pour pouvoir tirer profit de la masse d'accumulation d'une dalle en béton avec faux plafond suspendu, il faut ventiler le vide sur toute la surface et avoir un taux de perforation du plafond de plus de 10% de la surface. Pour que la ventilation nocturne soit efficace, l'air doit pouvoir entrer directement en contact avec la masse du bâtiment. Il faut donc veiller, lorsqu'on pose l'isolation phonique, à ne pas recouvrir complètement les parois.

Voir aussi paragraphes 3.2, 4.1, 4.5, 4.7.

A1

Choix de matériaux de construction et d'aménagement intérieur, pauvres en émissions polluantes

Par le choix judicieux de matériaux de construction et d'aménagement intérieur, on peut éviter des émissions polluantes. Il faut à tout prix renoncer à augmenter le débit d'air de l'installation à seule fin de diluer et évacuer des émissions qu'on aurait pu empêcher.

Voir aussi paragraphes 3.3, 4.2.4.

Protection solaire efficace

Toutes les surfaces vitrées de locaux refroidis devraient disposer d'une protection solaire efficace ou d'une installation permettant de faire de l'ombre. Même Les locaux d'habitation ou les bureaux non refroidis devraient disposer d'une telle protection.

En règle générale, il faudrait atteindre un taux de passage d'énergie globale, y compris protection contre le soleil, inférieur ou égal à $g = 0,15$. Des valeurs indicatives de combinaisons typiques de vitrage et protection solaire se trouvent sous chiffre 7.3.2 de la recommandation SIA V382/2. Lors du choix du dispositif de protection solaire, il faut veiller à avoir non seulement une bonne protection, mais aussi une bonne utilisation de la lumière naturelle. En façade nord, on peut en général renoncer à une protection, respectivement utiliser un verre légèrement réfléchissant contre le rayonnement diffus.

On ne peut que recommander, que la protection solaire extérieure soit réglable automatiquement et différenciée par façade.

Voir aussi paragraphes 3.2, 4.2.4, 4.5.

Séparation des zones à usage différent

Il faut maintenir les zones qui posent des conditions particulières en matière de climat ambiant, aussi petites que possible. Cela peut se faire au moyen de séparations lors de la construction, mais aussi par des mesures techniques ou de fonctionnement. Il est recommandé de prévoir une séparation lors de la construction, pour les zones à réfrigérer, les zones fumeurs et non-fumeurs.

Voir aussi paragraphes 3.2.4, 3.3, 4.5, 4.6.

Concept de protection antifeu

La répartition des compartiments coupe-feu peut avoir une grande influence sur la disposition des installations de ventilation. C'est pourquoi il faut établir assez tôt, et en collaboration avec la police du feu, un concept de protection contre les incendies. On pourra ainsi déterminer la disposition des centrales et des gaines techniques.

Voir aussi paragraphes 4.1, 4.2.

A1

Disposition et surfaces nécessaires pour les installations techniques du bâtiment

Il faut tenir compte, dès le début de la planification, des surfaces nécessaires aux canaux, gaines techniques et centrales de ventilation, ainsi qu'aux autres installations du bâtiment. L'annexe 1 de la recommandation SIA V382/1 donne des indications quant aux besoins en surface des installations de ventilation.

Pour réduire les pertes de charge, il faut prévoir des chemins courts entre prise d'air extérieur, centrale et locaux. La prise d'air extérieur doit être placée de telle façon que l'air soit aussi peu pollué que possible. Lorsque les installations deviennent plus grandes, il peut être judicieux de les subdiviser en plusieurs centrales et plusieurs gaines. Là encore, il faut tenir compte du cloisonnement coupe-feu. Plus la subdivision est poussée, plus la protection feu et les modifications ultérieures du réseau deviennent faciles.

Voir aussi paragraphes 4.1, 4.2.

Concept d'éclairage

Grâce à un concept d'éclairage adapté, on peut en général maintenir le dégagement de chaleur de l'éclairage autour de 10 W/m², pour une utilisation normale du type « bâtiments administratifs ». La recommandation SIA V382/2 donne sous chiffre 6.2.1 des valeurs indicatives pour le niveau d'éclairement nominal et la puissance spécifique de raccordement à prévoir. La lumière naturelle devrait suffire pendant la journée, dans la zone proche des fenêtres, sur une profondeur de 5 à 6 m.

Il est recommandé de subdiviser l'éclairage artificiel en fonction des besoins, en différentes zones, de manière à pouvoir le régler de façon différenciée. Prévoir au moins deux niveaux différents.

Voir aussi paragraphes 3.2, 4.1, 4.2.4, 4.5.

Utilisation de la lumière du jour

Mettre à profit toutes les possibilités d'éclairage naturel permet une réduction sensible de la demande en énergie pour l'éclairage artificiel. Des mesures simples, comme des surfaces vitrées placées judicieusement (aussi haut que possible), des protections solaires réglables et des couleurs claires dans les locaux (particulièrement important pour les plafonds), donnent déjà de bons résultats.

Il existe aujourd'hui différents programmes d'ordinateurs fiables, aussi pour PC, qui permettent de déterminer l'utilisation de la lumière du jour.

Voir aussi paragraphe 4.1.

A2

Aide-mémoire pour la conception des installations de ventilation et de climatisation

Détermination claire des bases et des conditions de garantie

La recommandation SIA V382/1 précise les exigences à satisfaire concernant les conditions ambiantes et la zone d'occupation. L'annexe 2 de SIA V382/1 propose un formulaire des données techniques du local, qu'il faudrait remplir pour toutes les zones, en collaboration avec le maître de l'ouvrage.

Des exigences plus élevées ne doivent être acceptées que dans des cas exceptionnels et fondés. En exploitation, il faut veiller à effectivement exploiter les tolérances de garantie admises, par exemple en température ambiante, pour diminuer la consommation d'énergie.

Voir aussi paragraphes 3.1, 4.1, 4.5, 4.6.

Amenée d'air frais en fonction des besoins

Si le taux d'occupation est très variable ou s'il y a d'autres charges variables, il faut prévoir une amenée d'air frais réglable en fonction des besoins, par exemple au moyen d'un détecteur de CO₂ ou de mélange de gaz. Souvent, une mise en service au moyen d'un détecteur de présence ou de mouvements est aussi utile.

Voir aussi paragraphes 3.1.4, 3.2.3, 4.2.4, 4.13.

Puissance thermique et de refroidissement

Le calcul de la puissance thermique et de refroidissement à installer dans le bâtiment s'effectue à l'aide des recommandations SIA 384/2 et SIA V382/2.

Voir aussi paragraphes 3.2, 4.5.

Sources internes de chaleur

Les charges effectives, avec leur déroulement journalier et leur simultanéité, sont déterminantes pour dimensionner les installations pour le service hivernal et estival. Le chapitre 6 de la recommandation SIA V382/2 précise la méthode de calcul à adopter. Les indications de puissance qu'on trouve sur les plaquettes signalétiques des appareils sont inutilisables dans ce cas.

Voir aussi paragraphes 3.2, 4.2.4, 4.5.

Sources locales de chaleur, polluants, humidité

Dans la mesure du possible, les émissions concentrées de chaleur, de polluants ou d'humidité devraient être évacuées à la source, afin de ne pas charger le climat ambiant. Pour de grandes sources locales inévitables, il faut si possible construire une séparation.

Voir aussi paragraphes 3.1, 3.2, 3.3, 4.2.4, 4.5.

A2

Circulation de l'air dans le local	<p>La circulation de l'air dans le local doit garantir un bon balayage de l'ensemble du volume. Comme grandeur indicative de l'efficacité de la ventilation, on utilise le rapport entre le temps de séjour minimum de l'air dans le local et le temps de séjour moyen des polluants.</p> <p><i>Voir aussi paragraphe 4.2.4.</i></p>
Free-cooling	<p>Il faut exploiter les différentes possibilités de free-cooling (utilisation directe de l'air extérieur frais, production d'eau glacée à partir d'une tour de refroidissement, etc.), pour autant que cela réduise la consommation totale d'énergie.</p> <p><i>Voir aussi paragraphes 4.5, 4.7.</i></p>
Utilisation des rejets thermiques	<p>Il faut exploiter les rejets de chaleur, pour autant qu'une demande existe et que cette utilisation soit économiquement justifiable.</p> <p><i>Voir aussi paragraphe 4.3.</i></p>
Utilisations différenciées	<p>Le concept de l'installation doit permettre un fonctionnement individuel pour des locaux qui ont des exigences différenciées quant au climat ambiant et pour ceux qui ont des périodes d'utilisation différenciées. Dans la mesure du possible, il faut séparer de telles zones lors de la construction.</p> <p><i>Voir aussi paragraphes 3.1, 4.2.4, 4.5, 4.6, 4.12, 4.13.</i></p>
Registre terrestre à air	<p>Pour réduire la consommation d'énergie primaire, il faut examiner l'utilité d'un registre terrestre à air pour préchauffer l'air neuf en hiver et le refroidir en été.</p> <p><i>Voir aussi paragraphe 4.10.</i></p>
Sonde géothermique	<p>Pour réduire la consommation d'énergie primaire, il faut examiner l'utilité de sondes géothermiques.</p> <p><i>Voir aussi paragraphe 4.11.</i></p>
Concept de mesures	<p>Lors de la planification d'une installation il faut prévoir à temps un concept de mesure, ainsi que les possibilités de le réaliser lorsque l'installation est en exploitation.</p> <p><i>Voir aussi paragraphes 3.1, 4.1.</i></p>

A3

Aide-mémoire pour la conception de composants particuliers

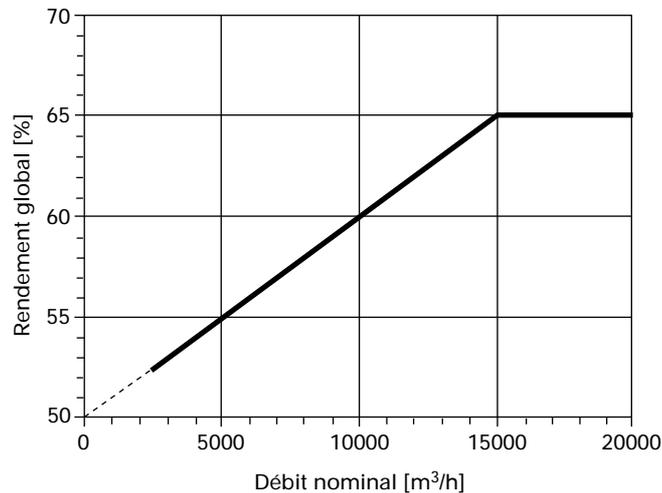
Faible puissance pour le transport de l'air

Lors du dimensionnement du réseau de canaux et du choix des appareils, il faut prévoir des vitesses d'air et des pertes de charge faibles. Selon SIA V382/3, la perte de charge totale (pulsion + aspiration, y compris RC) au débit d'air maximum et filtres propres, ne devrait pas dépasser 1200 Pa. La valeur-limite est de 900 Pa pour des installations énergétiquement très performantes.

Voir aussi paragraphes 3.4, 4.2.4.

Bon rendement des ventilateurs

Selon SIA V382/3, le rendement global des ventilateurs y compris moteur et transmission doit atteindre au banc d'essai, au point de fonctionnement optimal, les valeurs suivantes :



Pour des installations énergétiquement très performantes, ce rendement est majoré de 5%.

Une attention particulière doit être portée à la disposition et au montage du ventilateur ainsi qu'au régime à charge partielle. Le dimensionnement doit pour autant que possible assurer un bon rendement dans toute la plage de travail.

Pour comparer différents appareils, destinés au même travail, il faut surtout comparer le rendement global, à savoir :

$$\eta = \frac{V \cdot \Delta p_{\text{tot}}}{P}$$

V	Débit d'air [m³/s]
Δp_{tot}	Perte de charge totale du système [Pa]
P	Puissance électrique absorbée par le système moto-ventilateur [W]

Cette façon de faire tient ainsi compte du rendement de chaque appareil composant le système moto-ventilateur, tel que : régulateur de vitesse, moteur, transmission, ventilateur.

$$\eta = \eta_{\text{régul.}} \cdot \eta_{\text{moteur}} \cdot \eta_{\text{transm.}} \cdot \eta_{\text{ventilateur}}$$

et représente donc le rapport entre ce que le ventilateur produit : débit d'air et pression, et ce que le système consomme comme énergie électrique pour produire ce débit d'air et cette pression.

Voir aussi paragraphes 3.4, 5.2, 5.5, 5.6, 6.4, 6.5.

A3

Récupération de chaleur

En règle générale, il faut équiper d'une récupération de chaleur toute installation disposant d'air pulsé chauffé ou refroidi. Les exigences sont calquées sur les directives SICC 89-1 F « Systèmes de récupération de chaleur ».

Voir aussi paragraphe 4.3.

Humidification

Si une humidification de l'air ambiant est nécessaire, elle doit être restreinte au minimum admissible et fonctionner en règle générale selon le principe adiabatique. Par principe, une humidification de l'air ambiant devrait toujours se faire en relation avec une récupération de chaleur permettant l'échange d'humidité.

Voir aussi paragraphes 3.1, 4.3, 4.6.

Machines de production de froid

Si une production de froid mécanique est nécessaire, la température de l'eau glacée doit alors être adaptée au besoins réels et être plutôt élevée, alors que la température de condensation doit être choisie aussi basse que possible. Pour des pointes de charge de courte durée, il faut envisager l'utilisation d'accumulateurs à un niveau de température adapté. La chaleur dégagée lors de la production de froid devrait pour autant que possible être utilisée.

Voir aussi paragraphes 3.1, 4.5.

Conduites pour le fluide frigorigène et pour l'eau glacée

Les conduites pour le fluide frigorigène et pour l'eau glacée devraient être isolées non seulement pour éviter l'eau de condensation, mais aussi pour maintenir les pertes aussi basses que possible.

Prévoir la possibilité de mettre les différentes zones individuellement hors service.

A4

Aide-mémoire pour l'exploitation des équipements

Adapter la température ambiante aux besoins

L'énergie nécessaire pour le chauffage et la ventilation peut être réduite de façon notable, si la température de l'air ambiant peut varier dans une plage la plus large possible.

En « hiver », la plage de températures de l'air pour des bureaux est considérée comme normale entre 19 et 24° C. Pour le refroidissement (pour autant qu'il soit nécessaire), elle se situe entre 22 et 28° C, bien que lors de grandes chaleurs, lorsque la température extérieure dépasse les 30° C, des températures internes plus élevées sont admissibles.

Dans beaucoup de locaux secondaires, la variation de température de l'air peut être nettement plus grande. Elle devrait pour autant que possible être exploitée.

Voir aussi paragraphes 3.1, 3.2, 4.5.

Adapter l'humidité ambiante aux besoins

La zone de confort s'étend de 30 à 65 % d'humidité relative. Des variations occasionnelles sont physiologiquement acceptables quelques jours par année, jusqu'à 20 % ou 75 % d'humidité relative.

Dans les bureaux et les habitations, il n'est en général pas nécessaire d'humidifier l'air. Des plaintes quant à un air trop sec en hiver, sont souvent dues à un taux d'air extérieur trop élevé, des charges de polluants trop grandes dans l'air ambiant ou une température ambiante trop élevée.

Voir aussi paragraphes 3.1, 4.3, 4.6.

Adapter le mode et l'horaire d'exploitation aux besoins

Il faut toujours veiller à adapter le fonctionnement de l'installation aux besoins réels.

Une des mesures les plus efficaces consiste à arrêter complètement l'installation lorsqu'on n'en a pas besoin. Cela peut être réalisé simplement, par exemple au moyen d'une horloge et d'un programme hebdomadaire.

Lorsque l'installation doit être en service, elle ne devrait transporter que la quantité d'air nécessaire. Pour cela, l'installation devrait être équipée d'entraînements réglables par paliers ou en continu. Une régulation automatique de la quantité d'air peut se faire au moyen d'un détecteur de CO₂ ou de mélange de gaz.

Voir aussi paragraphes 3.1, 4.12, 4.13.

Utilisation rationnelle de la protection solaire en hiver

En hiver, le rayonnement solaire qui pénètre par les fenêtres aide à réduire la demande en énergie du chauffage. Durant cette période, la protection contre le soleil devrait uniquement servir de protection contre l'éblouissement, afin de ne pas réduire le gain de chaleur.

Durant la nuit, des stores extérieurs bien ajustés peuvent aider à réduire la déperdition par transmission. Leur utilisation est vivement conseillée durant la période de chauffage.

A4

Eviter les charges thermiques inutiles en été

a) Charges externes

En été, la protection solaire devrait empêcher que le rayonnement ne pénètre dans le local et produise ainsi un réchauffement indésirable, respectivement contribue à l'augmentation de la charge frigorifique. Lors de l'utilisation d'une telle protection, il faut veiller à l'abaisser dès que les premiers rayons de soleil directs entrent dans la pièce, et pas seulement lorsque la température ambiante devient trop élevée. Il faut noter que les stores à lamelles offrent aussi bien une bonne protection contre le soleil, qu'une bonne utilisation de la lumière naturelle. Pour autant que cela soit compatible avec la sécurité, la protection solaire ne devrait pas empêcher le refroidissement nocturne par les fenêtres.

b) Charges internes

Durant l'hiver, les charges internes contribuent au chauffage du local (toutefois pas très efficacement); par contre en été, elles sont indésirables, puisqu'elles augmentent la température ambiante, respectivement la charge frigorifique.

Afin de réduire les charges internes dues aux machines et aux appareils, il faut observer les mesures suivantes:

- s'assurer de la nécessité des appareils qui dégagent de la chaleur;
- voir s'il est possible de les placer hors de la zone de confort;
- contrôler les possibilités de réduire les dégagements de chaleur de ces appareils (fonctionnement en charge partielle, stand-by, arrêt dès que possible);
- lors de l'achat de nouveaux appareils ou du remplacement d'anciens, veiller à une consommation réduite en électricité, à la possibilité d'un fonctionnement conforme aux besoins et à une extraction directe de la chaleur;
- lors de charges internes élevées inévitables, contrôler la possibilité d'une extraction directe au moyen d'un système fermé à eau ou à air.

Voir aussi paragraphes 3.2, 4.1, 4.2.4, 4.5.

A4

Contrôle régulier et entretien

Il faut contrôler régulièrement que les mesures énoncées dans les points précédents soient respectées.

L'entretien régulier de l'installation doit aussi englober les contrôles suivants:

- contrôle et le cas échéant échange des filtres;
- contrôle de la tension des courroies plates ou trapézoïdales;
- nettoyage des éléments de l'installation, y compris canaux et grilles;
- nettoyage des sondes et contrôle des valeurs de consigne.

Voir aussi paragraphes 3.4, 4.1, 6.4.

Comptabilité énergétique

Tenir une comptabilité énergétique et faire des comparaisons avec les années précédentes. Pour cela, prévoir déjà l'appareillage de mesure nécessaire lors de la planification.

Voir aussi paragraphes 3.4, 3.5, 4.1.

Optimisation de l'installation

La pratique montre que beaucoup d'installations possèdent un grand potentiel d'optimisation. Il est donc souvent judicieux de prolonger les mesures après la réception et même de prévoir un programme de mesures à long terme.

Voir aussi paragraphe 4.1.4.

Associations de soutien

ASCV

Association suisse des entreprises
de chauffage et de ventilation

Astech

Association des techniciens
en chauffage, climatisation et froid

SBHI

Ingénieurs-conseils suisses
de la technique du bâtiment
et de l'énergie

SIA

Société suisse des ingénieurs
et des architectes

SICC

Société suisse des ingénieurs
en chauffage et climatisation

UTS

Union technique suisse

UVACIM

Union vaudoises des associations
commerciales,
industrielles et des métiers
