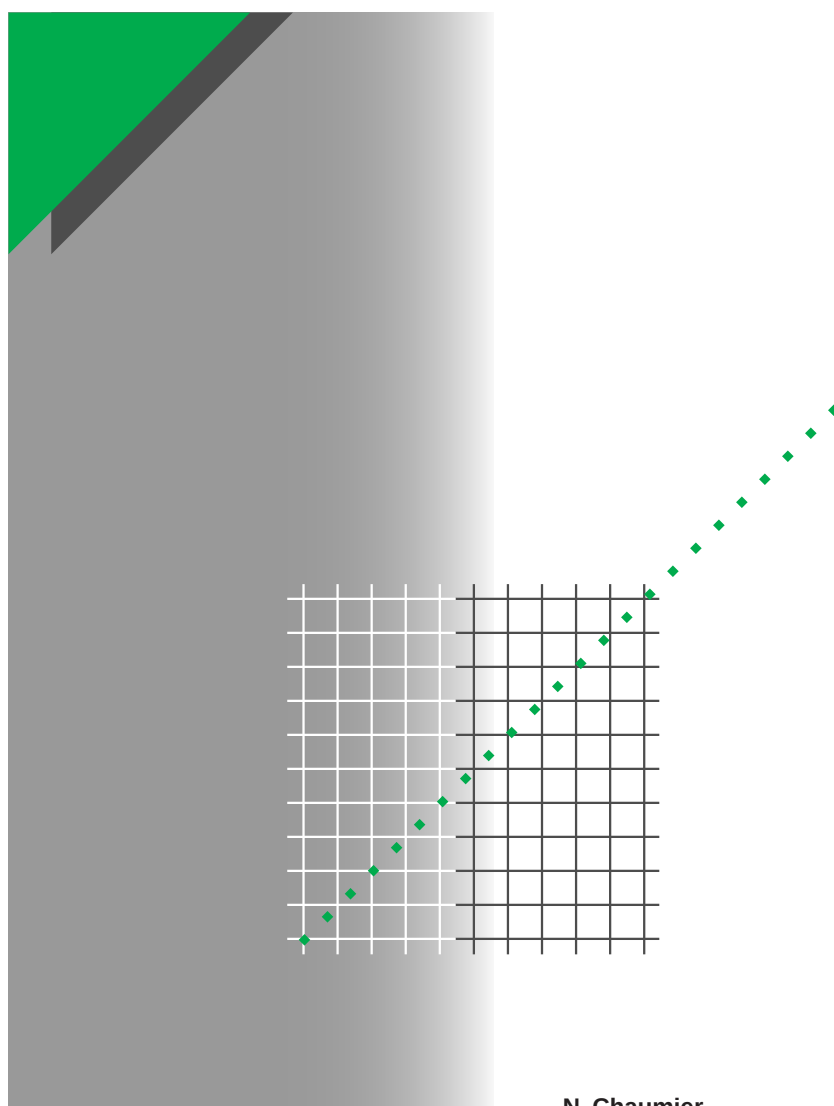


Cahier technique n° 206

Les économies d'énergie dans le bâtiment

Merlin Gerin
Modicon
Square D
Telemecanique



N. Chaumier

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

n ° 206

Les économies d'énergie dans le bâtiment

Nicolas CHAUMIER



Ingénieur diplômé de l'école centrale de Paris (1974).
Après un premier emploi dans la recherche nucléaire, il travaille dans la recherche et le développement pour des matériels haute tension, puis en tant que responsable des services R et D au sein d'une entreprise française d'équipements de chauffage. Il participe à l'élaboration des normes thermiques dans le cadre de la Commission Européenne.
En 1988, il rejoint Schneider Electric pour négocier et exécuter des contrats internationaux. Il crée et anime des formations sur les réseaux électriques et la conduite des affaires.
Actuellement, il participe au développement des activités commerciales dans plusieurs pays en s'appuyant sur la connaissance des besoins des clients.

Les économies d'énergie dans le bâtiment

Quel que soit le bâtiment à construire ou à gérer, des solutions pour la maîtrise de la consommation d'énergie doivent être recherchées. Ceci est vrai, dans le monde entier, pour tous les types de bâtiments : industriels, tertiaires ou résidentiels.

Avant de concevoir ou d'améliorer un bâtiment, et particulièrement son installation électrique, il est indispensable d'étudier ses besoins énergétiques et les sources disponibles, et de rechercher la meilleure adéquation des systèmes de gestion, des réseaux de distribution et des équipements consommateurs en tenant compte des impératifs d'exploitation.

Ce Cahier Technique présente une méthodologie pour conduire efficacement toute étude préalable. Pour cela l'auteur explore tous les éléments contributifs aux économies d'énergie qui, selon l'installation concernée, seront ou non à retenir.

Sommaire

1 Introduction	1.1 Les acteurs	p. 4
	1.2 Les besoins	p. 4
2 Inventorier les consommations et les sources d'énergie disponibles	2.1 Les consommations d'énergie	p. 5
	2.2 Les sources d'énergie	p. 6
3 Réduire les coûts énergétiques	3.1 Analyse des factures d'énergie	p. 8
	3.2 Utilisation du contrat existant	p. 8
	3.3 Renégociation du contrat	p. 8
4 Réduire la consommation d'énergie	4.1 Economie sur le système de CVC	p. 10
	4.2 Economie sur l'eau chaude sanitaire	p. 15
	4.3 Economie sur l'éclairage	p. 16
	4.4 Réduction des pertes d'énergie électrique	p. 17
	4.5 Autres économies	p. 19
	4.6 Avantages d'une bonne maintenance	p. 19
	4.7 Importance du comptage	p. 20
	4.8 La démarche d'audit énergétique	p. 20
5 Etudes de cas	5.1 Optimisation de la facture d'énergie d'un hôpital	p. 21
	5.2 Installation de ventilation avec variateur de vitesse	p. 21
6 Conclusion		p. 23
Annexe : la cogénération		p. 24

1 Introduction

Il convient tout d'abord d'identifier tous les acteurs concernés par le bâtiment à étudier,

et leurs besoins en relation avec la gestion de l'énergie.

1.1 Les acteurs

Les principaux sont :

- l'exploitant, qui peut être l'occupant du bâtiment, ou une compagnie d'exploitation déléguée,
- le maître d'ouvrage, propriétaire du bâtiment, soit pour l'occuper lui-même, soit à titre d'investisseur,

- le maître d'œuvre : architecte ou bureau d'études responsable de la construction du bâtiment,
- les fournisseurs, notamment les fournisseurs d'énergie (régie d'électricité, distributeurs de fuel et de gaz...),
- les autorités de régulation compétentes pour le bâtiment considéré.

1.2 Les besoins

Les besoins des exploitants

Tous les exploitants, industriels et commerciaux, ont l'impérieuse nécessité de proposer des produits ou des services à des prix compétitifs. Le premier objectif d'un exploitant est donc, avant tout, de réduire sa facture d'énergie par un meilleur tarif, par la réduction de la consommation d'énergie, et par les aides publiques à la réduction de consommation d'énergie. Et ceci tout en assurant le bon fonctionnement de tous les services nécessaires à l'activité pratiquée et au confort des personnes qui occupent le bâtiment, employés et visiteurs.

Les besoins des maîtres d'ouvrage

- obtenir la conformité aux règlements énergétiques en vigueur,
- bénéficier des aides accordées pour la mise en place de systèmes économisant l'énergie,
- augmenter et maintenir la valeur immobilière de leur bien.

Les besoins des maîtres d'œuvre

- être compétitif en prestations et en coût au moment de la sélection,
- tenir le budget pendant la réalisation.

Les besoins des fournisseurs d'énergie

- optimiser le fonctionnement de leur réseau,
- maîtriser les pics de demande d'énergie sans surdimensionner les installations.

Et, dans le cas particulier de l'énergie électrique :

- maîtriser l'énergie réactive,
- maîtriser la qualité de l'énergie (réduire les fluctuations de tension, les coupures, les harmoniques...).

Les besoins des autorités de régulation

Les différents organismes officiels ayant autorité dans la conception des bâtiments sont chargés par les Etats de mettre en œuvre une politique générale de l'énergie dont les objectifs principaux sont notamment :

- assurer la gestion à long terme des approvisionnements nationaux en énergie, avec le souci d'une meilleure indépendance énergétique ;
- assurer une cohérence avec la considération globale des aspects environnementaux : réchauffement climatique, émission de CO₂ dans l'atmosphère, émission de chaleur, émission de produits polluants ;
- rendre compatible le développement économique avec le maintien des conditions environnementales qui le rendent possible (« développement durable ») ;
- promouvoir et appliquer les conventions internationales relatives à l'énergie et à l'environnement.

Dans certains cas, les différents acteurs ont des intérêts directs apparemment opposés ; par exemple, installer un système de chauffage performant plus cher à l'achat est une charge supplémentaire pour l'investisseur, mais est une économie pour l'exploitant. Dans d'autres cas, un même acteur peut avoir deux rôles simultanés (cas de l'occupant propriétaire).

D'où la nécessité d'une démarche globale, tenant compte aussi bien des coûts de l'énergie que des coûts d'installation et de ceux de la maintenance des équipements.

Tout ceci avec une exigence fondamentale : ne pas réduire la capacité de production ni le niveau de confort du bâtiment.

2 Inventorier les consommations et les sources d'énergie disponibles

2.1 Les consommations d'énergie

Nous faisons tout d'abord l'inventaire des consommations d'énergie, de tous types, qui ont lieu dans l'utilisation quotidienne du bâtiment pour remplir les fonctions attendues.

Le process industriel ou commercial qui occupe le bâtiment

Le « process » est l'ensemble de l'installation directement nécessaire à l'activité professionnelle des occupants du bâtiment. Il comprend :

- pour une usine ou un bâtiment commercial, les machines de production industrielle, les systèmes d'information, les installations de manipulation et de stockage des matériaux et des produits (réfrigération des produits alimentaires, par exemple), les réseaux de fluides spécifiques (air comprimé, vapeur) nécessaires à la production...
- pour un immeuble du tertiaire, les systèmes informatiques et les équipements spécifiques (de laboratoires, de recherche...).

Les consommations des process sont d'importance majeure. Elles représentent en général la plus grosse dépense d'énergie (sauf, par exemple, dans les immeubles de bureaux).

Selon l'activité considérée (usine de montage automobile, atelier textile, immeubles administratifs, grandes surfaces commerciales...), la quantité d'énergie consommée et le profil de consommation du process sont très divers. C'est pourquoi toute étude d'économie d'énergie doit être conduite en considérant le process dans son ensemble pour bien conserver, voire améliorer, les caractéristiques de production (capacité, fiabilité...).

Les systèmes de confort et utilités du bâtiment

Sont inclus dans cette catégorie, tous les systèmes usuellement rencontrés dans un bâtiment qui sont indépendants de son utilisation professionnelle. Ce sont tous les systèmes de chauffage, climatisation, ventilation, distribution d'eau chaude sanitaire, éclairage, communication, sécurité, distribution de fluides divers (notamment air comprimé), et les systèmes mécaniques (ascenseurs, élévateurs, escaliers roulants).

Selon le type, la superficie, la destination, l'occupation humaine et le standard de confort du bâtiment, les profils de consommation d'énergie sont très différents (cf. **fig.1**).

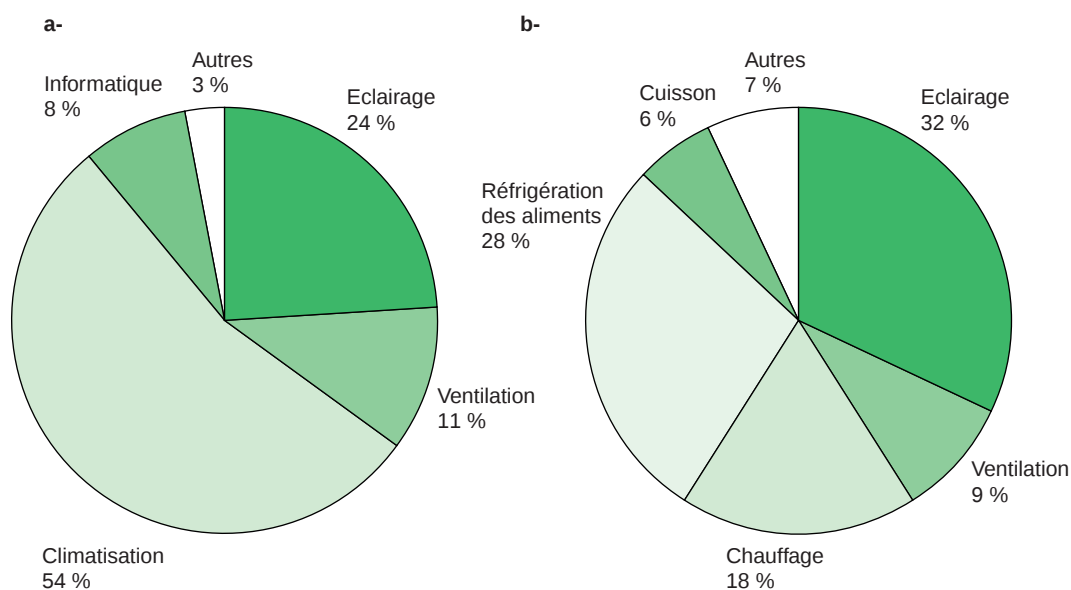


Fig. 1 : répartition des consommations annuelles d'énergie, **a]** dans un immeuble de bureaux en Asie du Sud-Est, **b]** dans un hypermarché en Europe Occidentale.

2.2 Les sources d'énergie

Pour couvrir les consommations d'énergie précédemment citées, il est possible d'utiliser toute la palette des sources d'énergie détaillée ci-après (cf. **fig. 2**).

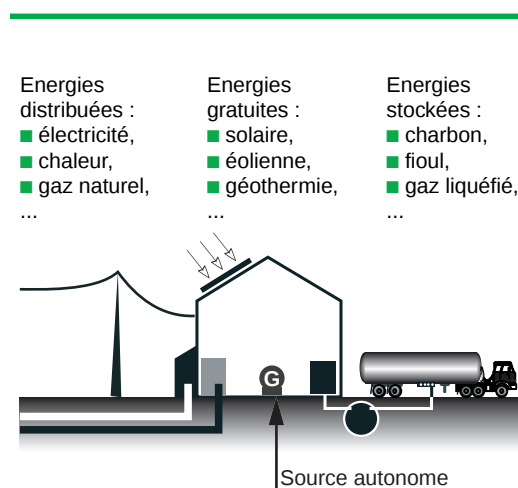


Fig. 2 : les différentes sources d'énergie.

Alimentation par des réseaux extérieurs

L'énergie est habituellement amenée au bâtiment par des réseaux publics de distribution d'électricité, de gaz naturel, et de chauffage urbain. D'autres types de réseaux publics de distribution peuvent être rencontrés, mais de façon beaucoup plus anecdotique : vapeur, air comprimé, combustible divers, eau glacée... Ces fournitures d'énergie font l'objet de contrats d'abonnement entre les fournisseurs (publics ou privés, en situation de monopole ou non) et les clients occupant le bâtiment.

L'énergie sous la forme électrique a une importance particulière, en ceci qu'elle est pratiquement obligatoire pour toutes les utilisations et tous les bâtiments. A part certains cas marginaux d'installations isolées (mines, sites pétroliers), rares sont les installations en autonomie complète. Il y a donc toujours au moins un raccordement au réseau électrique.

Le réseau de gaz naturel est en général utilisé pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la cuisine, quelquefois le process. La facturation est basée sur le comptage volumétrique (avec équivalence en énergie).

Il existe parfois un réseau public de distribution d'eau chaude généralement destiné au chauffage des bâtiments. Le cas se rencontre fréquemment dans les grands centres urbains (régie municipale disposant de chaufferies, par exemple en relation avec l'incinération des ordures ménagères), dans certains pays à tradition étatique, et plus récemment dans des zones semi-rurales, pour exploiter des déchets

de bois par exemple. La facturation est faite sur le comptage volumétrique et le différentiel de température.

Fourniture de combustibles stockés

En dehors des réseaux raccordés, l'énergie peut aussi être livrée sous forme de combustible stocké sur le site. Il s'agit généralement de gaz de pétrole liquéfié (propane, butane) ou de fioul domestique ou lourd, sans oublier le charbon qui dans beaucoup de pays tient une place importante, et le bois quand il est disponible localement, qui fait l'objet d'applications de technologie récente.

Ces combustibles peuvent être utilisés dans les chaudières pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, d'eau chaude ou de vapeur à usage industriel, et pour l'entraînement des générateurs électriques locaux.

L'utilisation de combustibles stockés sur le site permet une autonomie (partielle ou totale) face aux interruptions de service des réseaux extérieurs.

Sources autonomes d'électricité

Il est souvent indispensable, en fonction des conditions locales d'environnement, de se doter de moyens autonomes de production d'énergie électrique. En effet, dans de nombreux pays la distribution d'électricité ne présente pas une fiabilité suffisante : des interruptions de service trop fréquentes et trop prolongées empêchent la continuité normale de toute activité industrielle ou commerciale. C'est pourquoi, par exemple, les supermarchés des pays d'Amérique Latine sont fréquemment équipés d'une production autonome de 100% de la puissance nécessaire.

Cependant, même dans les zones d'approvisionnement le plus sûr, certaines activités comportant des exigences de sécurité doivent être protégées contre toute interruption, même rare. C'est ainsi que les hôpitaux, partout dans le monde, sont équipés d'une production autonome suffisante pour assurer le fonctionnement sans interruption des installations vitales.

De plus, disposer d'une source autonome est la base d'une gestion de l'énergie ; elle permet de choisir la source d'énergie préférentielle, en fonction du moment de la journée, de la puissance appelée instantanée, et du tarif horaire de la source externe.

■ Groupes électrogènes d'appoint ou de sécurité

Ces groupes utilisent généralement un combustible stocké. En général, l'énergie est produite en basse tension, et la sortie de l'alternateur est raccordée au réseau électrique interne. Selon les cas, le groupe et le réseau extérieur peuvent fonctionner en parallèle, ou seulement séparément.

■ **ASI – Alimentation Sans Interruption –**
électronique communément appelée
« onduleur »

De nombreuses installations comportent des ASI. Ces dispositifs électroniques de puissance permettent de reconstituer un courant alternatif à partir de l'énergie stockée dans des batteries d'accumulateurs électriques, ceci afin de maintenir sans interruption l'alimentation des récepteurs critiques ou vitaux (système de traitement des données, bloc opératoire dans un hôpital...).

■ **Cogénération**

La cogénération est une technique qui permet la production combinée de chaleur ou d'électricité en un seul procédé, avec pour résultat une réduction des pertes thermiques. Différents modèles de cogénération peuvent être utilisés :

- la production de chaleur (ou vapeur) nécessaire au process est disponible pour produire de l'énergie électrique,
- le process crée des sous-produits (déchets de bois ou de carton...) dont la combustion permet la production d'énergie électrique et de chaleur. La cogénération est plus détaillée en annexe.

Les « énergies gratuites »

Sous cette appellation sont réunies les sources énergétiques non facturées.

■ **Le rayonnement solaire**

□ Des capteurs solaires sont utilisés depuis plusieurs décennies, y compris dans les pays au climat froid (Scandinavie). Ils absorbent le rayonnement solaire et le transforment en énergie thermique. L'utilisation principale de cette énergie, via un fluide caloporteur, est le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire.

□ Les cellules photovoltaïques, de techniques plus récentes, transforment l'énergie lumineuse en électricité. De puissance plus petite que les capteurs thermiques, leur emploi est souvent réservé à l'alimentation d'habitats ou d'équipements isolés (relais hertziens, lampadaires...).

L'énergie recueillie par ces capteurs dépend essentiellement des conditions météorologiques : sa substitution à 100 % par une autre source est généralement indispensable.

■ **Géothermie et pompes à chaleur**

L'énergie thermique recueillie dans le sous-sol et les nappes d'eau (géothermie) ou dans l'air extérieur par les pompes à chaleur est aussi gratuite.

Nota : une pompe à chaleur est un équipement thermo-dynamique ayant pour fonction de transférer l'énergie calorifique d'un fluide (air ou eau) à un autre fluide (air ou eau).

■ **Energie éolienne**

L'énergie mécanique du vent, par l'intermédiaire d'une hélice, entraîne un alternateur.

Des producteurs d'électricité exploitent des installations récentes (fermes d'éoliennes) qui délivrent plusieurs mégawatts. Mais il existe aussi des installations privées de quelques kilowatts pour alimenter des bâtiments isolés (exploitations agricoles, hôtels).

Sauf les énergies gratuites, les différentes sources donnent lieu à des factures de la part des fournisseurs (d'électricité, de chauffage urbain, de combustible).

L'analyse de l'ensemble de ces factures est la première démarche conduisant à des réductions des coûts énergétiques pour l'exploitant (cf. **fig. 3**).

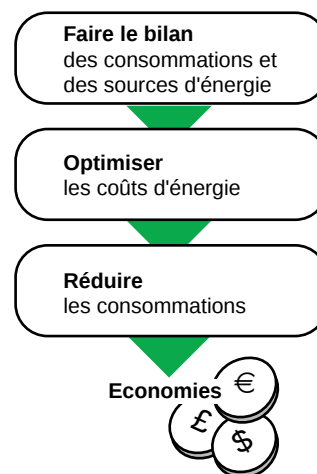


Fig. 3 : démarche générale de maîtrise énergétique.

3 Réduire les coûts énergétiques

Comme il a été dit plus haut, la motivation première des décideurs pour s'intéresser aux solutions de maîtrise énergétique est l'efficacité économique. Le gestionnaire d'un bâtiment, par exemple, pour décider d'un investissement en travaux d'amélioration, doit être convaincu du résultat immédiat de cette opération, et d'un temps acceptable de retour sur investissement (dans la plupart des cas de 2 à 5 ans).

L'économie en terme de coûts étant donc le souci prépondérant, il est très intéressant de chercher à optimiser l'utilisation des contrats de fourniture d'énergie, avant même d'envisager des modifications techniques qui aient pour effet une réduction des consommations physiques. Il s'agit donc de chercher à dépenser moins d'argent, avant de chercher à utiliser moins de kilowatts-heures.

3.1 Analyse des factures d'énergie

Dans cette approche exclusivement financière, il est possible de s'intéresser essentiellement à la fourniture d'énergie électrique, mais en regard de celle des autres énergies. Celle-ci se fait dans le cadre d'un contrat avec un fournisseur dont le profil, selon le pays, peut être très variable : entreprise nationale, régie de distribution publique, mixte ou privée, société de négoce et de service en position concurrentielle ou de monopole.

Dans ces conditions, la variété des types de contrats est grande, et l'éventail de choix s'élargit quand la puissance demandée pour le site augmente. Dans bon nombre de pays dont le secteur électrique est en voie de privatisation, les consommateurs ont accès à un marché concurrentiel quand leur besoin dépasse un seuil dit « d'éligibilité ».

Une facture d'électricité comporte en générale les postes suivants :

- des charges fixes : abonnement et autres (entretien, services...) ;
- des charges variables correspondant :
 - à la fourniture de l'énergie relevée par comptage ; coût qui peut être plus ou moins complexe et comporter plusieurs tarifs ;

- à la puissance maximale atteinte ou souscrite :
 - puissance active en kW ou puissance apparente en kVA intégrant la puissance réactive,
 - en valeur instantanée ou en valeur moyenne sur un intervalle de temps.

Il peut y avoir un ou plusieurs comptes selon l'heure ou la période ; il peut aussi s'agir d'une pénalité pour dépassement d'un seuil convenu ;

- à l'énergie réactive consommée, et comptée en général au-dessus d'un seuil toléré ;

- à d'autres charges et services variables ;

- des taxes.

Selon le pays, la facture d'électricité peut donc être compliquée voire extrêmement compliquée. Il est donc essentiel de comprendre son calcul, et de bien connaître les besoins d'énergie électrique du bâtiment, pour définir des axes d'amélioration. Le premier axe d'amélioration est la meilleure utilisation du contrat existant, le second est de renégocier ce contrat avec son fournisseur.

3.2 Utilisation du contrat existant

Plusieurs approches sont possibles pour bien exploiter un contrat de fourniture d'énergie électrique existant.

- Limiter la puissance appelée sur le réseau de distribution en utilisant les sources internes existantes et disponibles (groupes électrogènes). Ceci permet de ne pas surdimensionner le contrat d'abonnement, ou de ne pas dépasser la limite du contrat, d'où une réduction des coûts globaux d'énergie. Pour estimer le bilan économique il convient donc de connaître aussi le coût de l'énergie de

substitution, par exemple le rendement des groupes et le prix du combustible consommé. Il est évident que cette substitution de l'énergie électrique fournie par un distributeur par de l'énergie produite sur le site sera plus intéressante dans les périodes les plus chères (heures de pointe) selon le contrat. Cet avantage économique lié à la mise en œuvre d'une source interne, est indissociable d'un autre avantage très important : la possibilité de faire face à une interruption de la fourniture extérieure, et de maintenir les services essentiels.

■ Optimiser l'énergie réactive, en installant un dispositif de compensation afin de supprimer les pénalités facturées (ce qui a aussi pour effet de réduire les pertes d'énergie active).

■ Déplacer les consommations vers les périodes tarifaires les moins coûteuses, quand c'est possible. Certaines consommations d'énergie peuvent être différées sans entraver la productivité ni nuire au confort des occupants, par une gestion des récepteurs à l'aide d'un système automatique de commande.

Couramment, cette solution est appliquée pour la production d'eau chaude sanitaire avec les

chauffe-eau à accumulation (ballons d'eau chaude) ainsi que pour les systèmes de chauffage électrique à accumulation.

Une autre application : dans certains pays, des volumes importants de glace formés pendant les heures à faible tarif sont utilisés par des systèmes de réfrigération pour l'air conditionné.

Dans tous les cas, sauf s'il s'agit d'un simple délestage rendant impossible temporairement une opération ou un service, l'installation devra être conçue pour permettre ce type de fonctionnement.

3.3 Renégociation du contrat

Si l'utilisation du contrat de fourniture d'énergie électrique existant est déjà optimisée, il est toujours possible de négocier sa modification : par exemple d'adapter la puissance souscrite à l'activité du bâtiment (juste quantité d'énergie nécessaire et répartition dans le temps).

Il va de soi que plus le consommateur est important, plus le fournisseur sera flexible, même s'il est en position de monopole : les distributeurs ont aussi leurs difficultés dans la gestion de leurs ressources en énergie.

Cette négociation est bien sûr facilitée, si la fourniture d'énergie est en situation concurrentielle. Les impératifs des différents fournisseurs ne sont pas les mêmes, aussi leurs propositions peuvent donc être diversifiées, et permettre des adaptations aux besoins particuliers du client.

Dans certains pays, il est possible de passer un contrat unique avec un fournisseur d'énergie,

pour l'alimentation de plusieurs établissements gérés par une même compagnie, ou par un groupement d'intérêt de compagnies indépendantes. Les sites concernés ne sont pas forcément dans une même zone géographique : ils peuvent être dans des régions différentes d'un même pays voire, si les acteurs concernés sont internationaux, dans différents pays. Ces contrats « multisites » permettent d'optimiser la gestion de l'énergie électrique avec plus de latitude, à condition d'en maîtriser la complexité.

Il est parfois possible de faire appel à plusieurs fournisseurs d'énergie selon le besoin. Dans certains pays, les fournisseurs et les principaux acheteurs peuvent être mis en relation par des « Bourses de l'énergie », pour ensuite négocier en direct sur des quantités d'énergie à fournir au jour le jour. L'accession à ce marché, qui permet d'obtenir le meilleur prix à tout moment, est bien sûr réservé aux clients les plus importants.

4 Réduire la consommation d'énergie

L'économie en terme de coûts étant le souci prépondérant des exploitants, la première approche, objet du précédent chapitre, est d'essayer de payer moins cher une même quantité d'énergie. Cette approche est la plus facile, car elle ne nécessite pas de changer profondément les comportements ou les installations.

La démarche de réduction des coûts énergétiques impose de passer à l'étape suivante : s'efforcer d'utiliser une moindre quantité d'énergie pour le même résultat. Réduire les consommations est aussi fortement encouragé par les besoins des autorités de régulation (cf. chapitre 1).

Cela implique de modifier techniquement la conception du bâtiment à construire, ou pour les bâtiments existants, de concevoir et de réaliser

des travaux d'amélioration, d'adapter de nouveaux systèmes, voire de faire évoluer les procédures et les comportements des utilisateurs. En dehors du process, il s'agit de réduire l'énergie consommée par les systèmes fonctionnels du bâtiment (à capacité de production égale et à confort égal) présentés dans les sous-chapitres suivants.

Il faut cependant souligner que cette démarche concourt à améliorer et moderniser l'outil de production (apports de solutions nouvelles à la fois en performance et en qualité) : elle satisfait donc aussi à une nécessité professionnelle.

Le plus souvent, pour un bâtiment abritant un process industriel, le gisement principal d'économie se trouve dans l'outil de production qu'il faut donc étudier avec les spécialistes du métier considéré.

4.1 Economie sur le système de CVC

CVC désigne chez les professionnels les fonctions de Chauffage, Ventilation, Climatisation.

Les systèmes de CVC ont pour fonction d'adapter la température intérieure et l'air ambiant aux normes de confort. Mais il est à noter que la diversité des climats dans le monde conduit à des situations différentes :

- dans les pays à climat équatorial ou tropical, le confort consiste à réfrigérer les bâtiments,
- dans les pays à climat tempéré, océanique ou continental, le chauffage est indispensable en hiver, la climatisation est utile en été et parfois indispensable.

Dans beaucoup de bâtiments, la CVC est le premier ou le deuxième poste de dépense d'énergie.

Le chauffage

Les systèmes de chauffage sont utilisés depuis toujours quand la température extérieure descend au-dessous d'un seuil de confort (notion très relative dans le temps et dans l'espace). La plupart des pays d'Afrique, d'Asie du Sud et d'Amérique Latine n'utilisent aucun chauffage.

Le choix du mode de chauffage et de sa source d'énergie, qui doit être fait dès le début de la conception d'un bâtiment, est du ressort des spécialistes, architectes et thermiciens.

Dans tous les cas, la recherche d'économie passe par les actions suivantes :

■ Limiter les pertes thermiques du bâtiment

Selon le niveau et la variation de la température extérieure ce sont les systèmes de chauffage ou de réfrigération (climatisation) qui maintiennent la température intérieure dans la plage de confort (typiquement de 18 à 22 °C). En régime constant ces systèmes apportent ou retirent exactement la chaleur nécessaire pour compenser les pertes thermiques du bâtiment (cf. **fig. 4** page suivante).

La première démarche est de minimiser ces pertes. Pour cela il est possible de :

- concevoir les parois extérieures limitant la conduction thermique, et les dissipations par rayonnement,
- isoler également la toiture,
- utiliser des vitrages et des fermetures à isolation thermique (fenêtres à double vitrage, portes isolées),
- traiter les ponts thermiques (encadrements des ouvertures, structures porteuses telles que piliers ou poutres...),
- prévoir des occultations (volets) pour diminuer les pertes par les ouvertures,
- adapter des dispositifs pare-soleil pour éviter le rayonnement solaire quand il s'agit de refroidir.

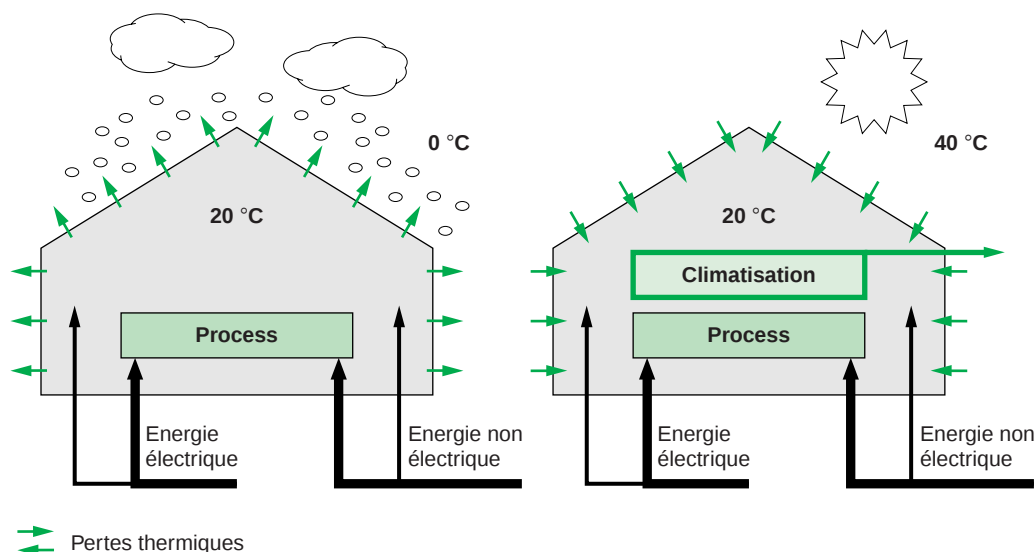


Fig. 4 : flux énergétiques dans le bâtiment.

Toutes ces actions sont plus aisées lorsqu'elles sont engagées dès la conception d'un bâtiment neuf, et donc moins coûteuses que pour des bâtiments existants sur lesquels les travaux d'isolation ou de rénovation sont contraignants. Des solutions moins onéreuses peuvent cependant être appliquées aux bâtiments existants notamment en réduisant les entrées d'air extérieur occasionnées par l'ouverture des portes et des fenêtres ou en réalisant un sas d'entrée. Dans tous les bâtiments, des interventions sur la conduite du chauffage permettent aussi des économies :

■ Empêcher l'utilisation simultanée du chauffage et de la climatisation

■ Eviter tout usage abusif du chauffage :

□ Dans tous les bâtiments où se pratiquent des activités commerciales, industrielles ou administratives, une température de 20 °C à 22 °C ne devraient pas être dépassée en période de chauffage. Dans les hôpitaux et centres de santé les températures de consigne sont nécessairement plus élevées ; au contraire, les gymnases et salles de sport admettent des ambiances plus froides.

□ Empêcher ou limiter l'ouverture des fenêtres (en période de froidure comme de fortes chaleurs), ou asservir les systèmes individuels de chauffage (et de réfrigération) à la fermeture des fenêtres.

□ Ne pas chauffer, ou éventuellement ne maintenir qu'hors gel, les locaux inoccupés ou partiellement occupés (stocks, locaux techniques).

Pour les bureaux individuels, les chambres, etc., il est possible de commander le fonctionnement du chauffage local, ou l'ouverture d'un volet d'air, par un détecteur de présence.

■ Optimiser le rendement des générateurs de chaleur

Un système de chauffage peut être individuel ou centralisé.

□ Un système individuel fait généralement appel à des radiateurs électriques (convecteur, radiant ou soufflant) qui chauffent séparément chaque volume du bâtiment (bureaux, chambres, parties communes). Cependant, bien que le rendement d'un radiateur électrique soit de 100 % (toute l'énergie utilisée est transformée en chaleur dans le bâtiment), ce mode de chauffage est rarement le plus économique. Pour être performant, il doit être contrôlé de manière à interrompre le chauffage dès qu'un local n'est pas utilisé.

□ Un système centralisé comprend un générateur de chaleur et un circuit de distribution. Lorsque la chaleur est achetée à un fournisseur, l'énergie est livrée par des canalisations d'eau chaude et un comptage thermique permet la facturation. Dans les autres cas, l'énergie calorifique est générée dans une chaudière située dans le bâtiment. Pour avoir un bon rendement, une chaudière doit être de conception récente, réglée et entretenue par un personnel qualifié. Son rendement peut être suivi, quelque soit le combustible, par la surveillance du taux de CO₂ et de la température des fumées.

■ Utiliser des pompes à chaleur

Seule ou en combinaison avec une chaudière, il est possible d'utiliser une pompe à chaleur dont le type dépend de la source de chaleur.

□ La source de chaleur peut être l'air extérieur, mais alors la pompe ne peut pas être utilisée efficacement au-dessous d'une limite de température, à cause du givrage. Les pompes à chaleur « air-eau » ou « air-air » sont donc surtout utilisées en demi-saison, la chaudière prenant la relève pendant les plus grands froids.

□ La source de chaleur peut aussi être de l'eau souterraine quand elle est disponible (cf. **fig. 5**), ou le sous-sol. Les pompes à chaleur sont alors du type « eau-eau » et présentent une plus grande plage d'utilisation, n'étant pas limitée par la température extérieure.

Nota : Le rendement d'une pompe à chaleur est mesuré par son coefficient de performance (COP), qui est le ratio de l'énergie thermique délivrée dans des conditions de température spécifiées, sur l'énergie électrique consommée par le compresseur (et le ventilateur éventuellement). Le COP d'une pompe à chaleur « air-eau » atteint 2 à 3,5 selon la température de l'air. Une pompe à chaleur « eau-eau » atteint un COP de 3 à 5.

■ Utiliser un chauffage solaire

Cette solution présente deux difficultés : elle nécessite une bonne exposition (orientation) pour l'installation de capteurs solaires, et la disponibilité de la chaleur est par nature sujette aux variations météorologiques. Elle ne peut être qu'un appoint thermique.

■ Optimiser les circuits caloporteurs

Lorsque l'énergie thermique est distribuée vers les différents locaux par un circuit d'eau ou d'air, dans le cas d'un système de chauffage centralisé, pour

économiser l'énergie il convient aussi de réduire la déperdition thermique le long des canalisations. L'isolation des tuyaux d'eau ou des conduites d'air est indispensable, surtout dans les zones non chauffées (gainés, chaufferie, locaux techniques). Il faut aussi réduire la consommation électrique des pompes ou des ventilateurs en adaptant des variateurs de vitesse, qui assureront la propulsion juste nécessaire au besoin à couvrir.

■ Optimiser le contrôle du chauffage

Le système de contrôle du chauffage doit assurer le confort des utilisateurs avec une consommation minimale d'énergie (cf. **fig. 6** page suivante).

En régime normal, tous les locaux effectivement utilisés doivent être à la température de confort. Pendant les périodes de non-utilisation (nuit, fins de semaines, vacances), la température peut être abaissée de plusieurs degrés.

En permanence, le maintien d'une température minimale « hors gel » est nécessaire pour ne pas dégrader les locaux et le matériel contenu.

Cette optimisation nécessite une programmation qui doit tenir compte :

□ De l'inertie thermique du bâtiment. Ainsi, le chauffage doit être remis en service quelques heures avant l'arrivée des occupants ; de même son interruption peut être commandée avant leur départ. Il est très intéressant de régler ces périodes au plus juste, en admettant une légère baisse transitoire du confort.

□ De l'occupation des locaux avec la possibilité de régler indépendamment la température des différentes parties du bâtiment, de façon à ne pas chauffer un local inutilisé ou utilisé de façon intermittente.

□ Du climat extérieur (température extérieure, vent, ensoleillement) de façon à estimer la déperdition thermique du bâtiment.

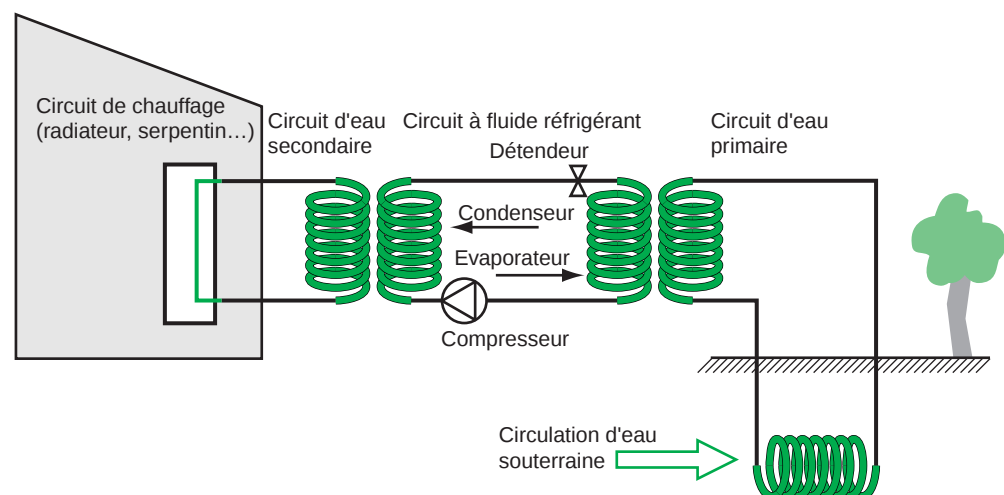


Fig. 5 : pompe à chaleur « eau-eau ».

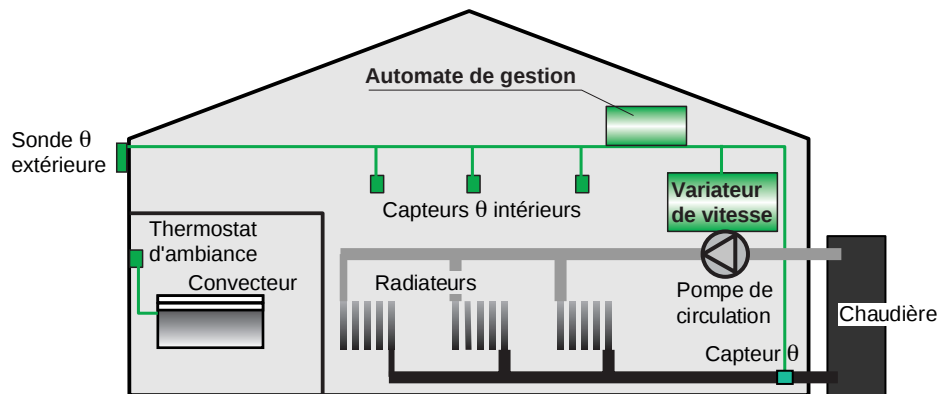


Fig. 6 : circuit caloporteur à eau.

□ Des « apports gratuits » que constituent le rayonnement solaire, le métabolisme des personnes présentes (environ 75 W /personne), ainsi que de la chaleur générée par les process (cuisine par exemple) et par l'éclairage intérieur. Ces apports gratuits sont pris en compte par les thermostats d'ambiance intérieure.

Enfin, pour un meilleur confort des utilisateurs, il est souhaitable de régler individuellement la température de consigne de chaque bureau. L'ajustement est réalisé par une vanne thermostatique commandant un radiateur à eau, ou par un volet commandant l'arrivée d'air.

La réfrigération de l'air ambiant (« climatisation » ou « air conditionné »)

Elle est nécessaire dans les pays à climat chaud, et est de plus en plus utilisée dans les régions tempérées pendant les périodes estivales. C'est un élément de confort important, souvent incontournable, ainsi qu'un poste important de dépense en énergie électrique dans le bâtiment.

Deux types d'installation sont possibles : des unités individuelles pour chaque partie du bâtiment (bureau, chambre...), ou un système centralisé comprenant une batterie de groupes générateurs de froid et un circuit de distribution de froid par air ou par eau.

Dans les deux cas, le fonctionnement de base est le même : un circuit frigorifique comportant un compresseur absorbe la chaleur de l'air intérieur et la rejette à l'extérieur (cf. fig. 7).

Pour économiser l'énergie consommée par une climatisation, la plupart des solutions exposées précédemment pour le chauffage sont applicables. Toutefois il faut souligner :

- qu'il est préférable d'avoir une température de consigne de l'ordre de 25 °C, qui est tout à fait compatible avec le confort et l'efficacité ;
- que les systèmes frigorifiques nécessitent une maintenance régulière. En effet, toute fuite de fluide frigorifique a pour effet de faire chuter fortement le rendement de l'unité. De même, la propreté des échangeurs influe beaucoup sur leur efficacité ;

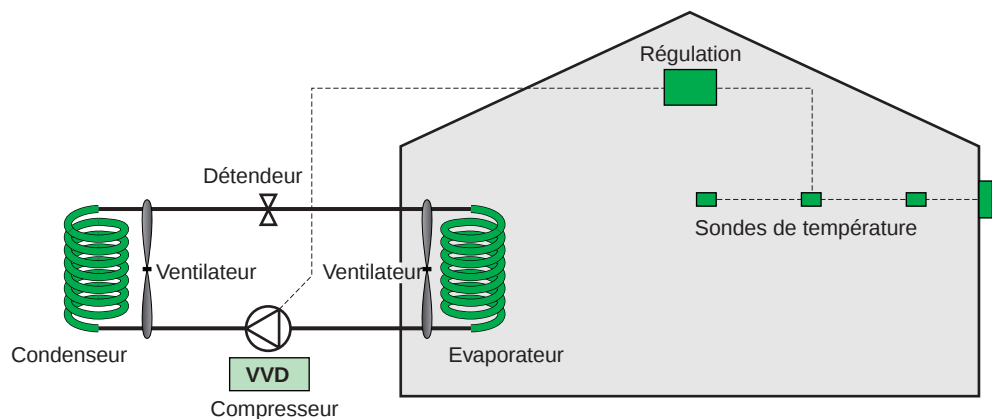


Fig. 7 : circuit frigorifique de climatisation.

■ que les nouveaux systèmes présentent généralement un rendement optimal, car leurs paramètres internes (pression, vitesse...) s'adaptent automatiquement au besoin thermique instantané.

Il est à noter que, contrairement au chauffage, il n'y a pas d'apport gratuit pour la réfrigération et que tout dégagement d'énergie calorifique (par exemple par des lampes à incandescence) dans un bâtiment réfrigéré augmente la dépense en énergie absorbée par le compresseur (cf. **fig. 8**).

Le renouvellement de l'air ambiant

Il s'agit d'extraire l'air intérieur, vicié par l'activité et la fréquentation du bâtiment, et de le remplacer par la même quantité d'air extérieur « frais ». Cette fonction est liée au chauffage et à la climatisation, car :

- le système de distribution d'air est souvent utilisé pour adapter la température,
- le volume d'air extérieur injecté doit être amené à la température de consigne, et ce besoin thermique s'ajoute aux déperditions du bâtiment.

C'est un poste important de la consommation d'énergie (cf. **fig. 9**). Pour le réduire différents moyens sont envisageables.

■ L'asservissement de l'extraction d'air

Une ambiance confortable pour les personnes occupant le bâtiment nécessite un système de renouvellement d'air, car :

- la température et le taux d'humidité doivent rester dans les limites spécifiées,
- la concentration de polluants de quelque nature que ce soit (produits par l'activité industrielle des occupants du bâtiment) doit rester acceptable,
- le dioxyde de carbone (notamment produit par la respiration des personnes présentes) doit être extrait du bâtiment.

C'est pourquoi les systèmes de renouvellement d'air sont obligatoires et que leur fonctionnement a d'autant plus d'importance pour la sécurité et le confort, que le nombre de personnes présentes est grand.

Tous les bâtiments ont donc un système de renouvellement d'air pour toutes les pièces du bâtiment. Ce sont généralement des systèmes

■ En demi saison

Période sans chauffage ni climatisation, la dépense énergétique est de 100 W.

■ En période de chauffage

Le dégagement calorifique, pris en compte par le thermostat, réduit la consommation du chauffage et le coût résultant de l'éclairage est nul.

■ En période de climatisation

A la consommation de l'éclairage (100 W) s'ajoute la consommation du compresseur (30 % typiquement) nécessaire à l'évacuation de cette chaleur. La dépense totale est alors de $100 + 30 = 130$ W.

Fig. 8 : influence des apports gratuits : exemple simple d'une lampe à incandescence de 100 W.

Le système existant comportait un caisson de traitement d'air et 2 moteurs (extraction et soufflage) de 16 kW à 1400 tours / min. De façon à réduire le débit d'air extrait et insufflé pendant les heures de faible occupation des chambres, la solution a consisté à équiper de variateurs de vitesse les 2 moteurs, et de les piloter par un programmateur horaire.

Coût de l'installation : 5000 €

Economie annuelle : 22 % de la ventilation soit 1900 €

Temps de retour de l'investissement : 2,6 ans

Fig. 9 : exemple d'économie réalisée avec la modification de l'installation de ventilation des chambres dans un grand hôtel (source Schneider Electric).

centralisés comportant une unité de traitement d'air et un réseau de canalisations. En règle générale, ces systèmes sont étudiés pour remplir leur fonction avec une occupation maximale des locaux (personnel habituel et visiteurs occasionnels). Or, en occupation normale, ce surdimensionnement du débit d'air est un important gaspillage d'énergie. Réguler le débit d'air extrait selon la concentration de CO₂ dans l'espace intérieur permet d'adapter la fonction du système à la demande. Avec plusieurs détecteurs de taux de CO₂, il est possible d'ajuster les débits par zones (cf. **fig. 10**).

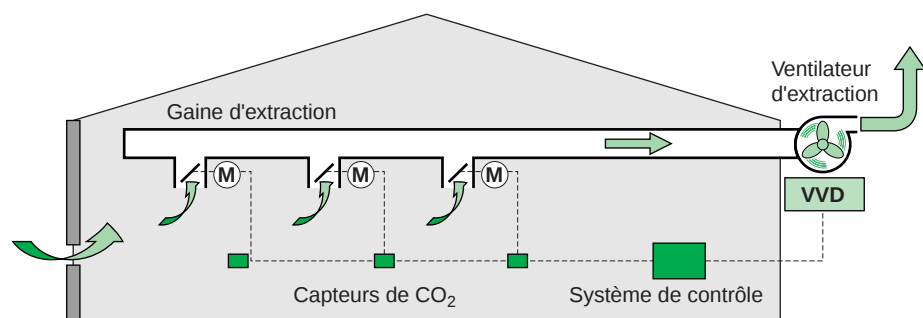


Fig. 10 : ventilation contrôlée par le taux de CO₂.

Remarque : Dans un parking, c'est le taux de monoxyde de carbone (CO) émis par les véhicules qui doit être contrôlé et une économie substantielle est aussi réalisable en adaptant le débit de la ventilation au besoin réel.

■ La ventilation mécanique à récupération de chaleur

En période de chauffage et / ou de réfrigération, le renouvellement de l'air intérieur conduit à rejeter à l'extérieur de l'air à 20 °C, pour le

remplacer par de l'air à 0 °C qu'il faut chauffer (ou à 40 °C qu'il faut réfrigérer). Pour réduire cette perte d'énergie, un échangeur à contre-courant entre l'entrée et la sortie d'air peut être installé. Il transfère l'énergie du flux le plus chaud vers le flux le plus froid.

L'économie réalisable est importante, mais ce fonctionnement doit être prévu dès la conception du bâtiment, par exemple pour la disposition des conduits.

4.2 Economie sur l'eau chaude sanitaire

Il faut distinguer l'eau chaude nécessaire à un process de l'eau chaude sanitaire.

L'eau chaude qui entre, en plus ou moins grande quantité, dans un process de production fait généralement l'objet d'un traitement spécifique (voir § Cogénération en annexe).

L'eau chaude sanitaire (ECS) utilisée le plus souvent pour les besoins d'hygiène, mais aussi pour des fonctions particulières, par exemple pour une cuisine ou un bar, ainsi qu'au nettoyage des locaux, est un service du bâtiment.

Pour économiser l'énergie utilisée pour la production d'eau chaude, plusieurs solutions sont possibles, voire cumulatives.

Mesurer les consommations d'eau chaude (volumes consommés), par zone du bâtiment, par service... afin de localiser les consommations anormales, de responsabiliser les utilisateurs, et éventuellement de leur imputer la dépense.

Détecter et supprimer les fuites d'eau chaude

Une fuite d'eau chaude, même minime, parce qu'elle a lieu en permanence, représente un volume important comparé aux quantités utilisées. Relativement à la consommation d'énergie utile, le gaspillage peut donc être considérable. Il convient donc d'assurer un bon entretien de la robinetterie.

Éviter les consommations inutiles

Choisir une robinetterie à détecteur de présence ou à arrêt automatique, ou des dispositifs sanitaires économes en eau.

Optimiser la température de consigne du système de production

Pour une utilisation sanitaire, la température ne devrait pas être supérieure à 55 °C, mais le confort des personnes est assuré avec 45 °C.

Prévoir et optimiser une boucle de circulation

Il y a une distance à ne pas dépasser entre la production et l'utilisation, de l'ordre d'une dizaine de mètres, faute de quoi l'eau coule froide trop longtemps. Outre que le consommateur perçoit un défaut de confort, le volume d'eau chaude effectivement consommé est la quantité totale puisée : la majeure partie de l'énergie est perdue (elle sert à réchauffer le tuyau à chaque usage).

Pratiquement :

■ dans les installations non résidentielles, il faut prévoir une production répartie (chauffe-eau à moins de 10 m de chaque point d'utilisation) ;

■ dans les bâtiments où il y a beaucoup de points d'utilisation (hôtel par exemple), une boucle est prévue dans laquelle l'eau chaude circule à proximité immédiate des utilisations. Ses tuyaux doivent être isolés efficacement et le débit de la pompe de circulation adapté de façon à obtenir au retour une température juste suffisante (40 °C) en l'absence de tout puisage. Pour cela, une commande de la pompe par variateur de vitesse est intéressante. Enfin, il est aussi possible, en fonction du profil de la courbe d'utilisation, d'arrêter la circulation quand le besoin d'eau chaude est statistiquement improbable.

Utiliser une pompe à chaleur dédiée à l'ECS

Il existe des unités de production d'eau chaude sanitaire à partir d'une pompe à chaleur, la source de chaleur étant soit l'air extérieur, soit l'air ambiant du local technique dédié au chauffage. Cette solution présente l'intérêt de pouvoir fonctionner toute l'année. Elle est particulièrement intéressante dans les pays à climat chaud, où elle assure une économie de 60 % par rapport à un chauffe-eau électrique direct. Dans les pays ayant une saison froide, un appoint par résistance est nécessaire.

4.3 Economie sur l'éclairage

L'éclairage est dans tous les bâtiments une prestation incontournable : il contribue à assurer la sécurité, le confort des occupants et la productivité des activités.

C'est un poste souvent très important de dépense d'énergie, et parfois le premier. Les principales approches d'économie d'énergie pour cette prestation sont les suivantes.

Réduire la puissance installée

Utiliser des lampes de conception récente, qui à flux lumineux égal ont une puissance nominale fortement diminuée, notamment les lampes fluo-compactes (- 70 % par rapport aux lampes à incandescence), les tubes fluorescents récents de petit diamètre (- 30 % par rapport aux tubes classiques) ; utiliser des lampes à ballast électronique (- 20 % par rapport aux ballast ferromagnétiques).

Utiliser des luminaires de conception récente, dont l'optique utilise au mieux le flux lumineux émis par les lampes.

L'économie sur la facture de consommation électrique est alors doublée d'une économie sur la durée de vie et la maintenance par la simplification qu'offre le matériel performant. Le confort visuel est également amélioré.

Supprimer les allumages inutiles

■ En fonction du niveau d'éclairement naturel
□ Dans un bâtiment, les zones situées près des fenêtres extérieures nécessitent moins d'apport lumineux que les zones intérieures. Tenir compte de cette remarque de bon sens permet d'économiser une proportion de l'énergie consommée, variable selon l'éclairement naturel intérieur pendant les heures de jour. Eclairement qu'il faut évidemment compléter lors des heures de service quand la nuit est tombée. Cette fonction peut être assurée par un dispositif de commande de l'éclairage intégrant une mesure d'éclairement ou par des gradateurs insérés dans les luminaires qui font varier automatiquement le flux émis en fonction de la lumière extérieure (cf. **fig. 11**).

□ A l'extérieur, il est aussi possible de réduire l'éclairage (parkings, allées, accès) aux heures les plus sombres. Cependant, comme dans la pénombre (au crépuscule) l'œil a besoin de plus d'éclairage artificiel que dans la nuit noire, il est judicieux de prévoir un détecteur de niveau d'éclairement et une horloge assurant la diminution progressive de la tension d'alimentation des sources lumineuses.

■ En fonction de la présence des occupants
Sauf un éclairage minimum de sécurité, il ne faut pas éclairer en permanence des zones non occupées ou occupées par intermittence. Sont

Remplacement de l'allumage permanent par allumage automatique sur détection de présence, et utilisation d'un interrupteur horaire programmable :

■ Les détecteurs utilisés ont un rayon de détection de 12 m, et commandent jusqu'à 500 VA de tubes fluorescents ou lampes fluocompactes. Ils sont installés en plafond tous les 20 m de façon à assurer le recouvrement des zones de détection.

■ L'interrupteur horaire commande le fonctionnement suivant : aux heures de passage intensif, 50 % des lampes sont allumées en permanence, et 50 % s'allument au passage d'une personne. Aux heures creuses, 50 % sont éteintes et 50 % s'allument au passage d'une personne.

Coût de l'installation : 2 000 €

Economie annuelle : 50 % de l'éclairage des couloirs soit 1 200 €

Temps de retour de l'investissement : 1,7 an

Nota : un éclairage de sécurité est déjà en place.

Fig. 11 : modification de l'installation d'éclairage des couloirs d'un grand hôtel (source Schneider Electric).

notamment concernés les couloirs, escaliers et paliers qui ne sont que des lieux de passage et les entrepôts et locaux techniques sans présence humaine permanente.

La minuterie classique est déjà une source d'économie importante.

Pour plus de performance et de confort, il existe des détecteurs de présence, qui sont même intégrables dans les luminaires : lorsqu'ils identifient un mouvement, ils commandent l'éclairage des lampes situées à proximité qui restent allumées tant que le mouvement est détecté. En l'absence de mouvement, les lampes s'éteignent après un temps réglable (quelques secondes à quelques minutes).

Concevoir un système automatisé de gestion de l'éclairage

Des systèmes automatisés communiquant avec les différents organes (luminaires, interrupteurs, détecteurs, appareils de mesure) permettent de commander des éclairages séparément, par zone géographique, par type de point lumineux, par fonction et individuellement. Ces systèmes sont paramétrables, reconfigurables et flexibles. L'économie d'énergie qu'ils permettent est maximale, tout en assurant le confort parfait de l'utilisateur.

4.4 Réduction des pertes d'énergie électrique

Le réseau électrique lui-même consomme toujours de l'énergie. De plus s'il n'est pas convenablement conçu et adapté aux besoins des utilisateurs, le réseau est une cause de gaspillage d'énergie et en même temps ne donne pas toute satisfaction en terme de qualité et de disponibilité d'énergie.

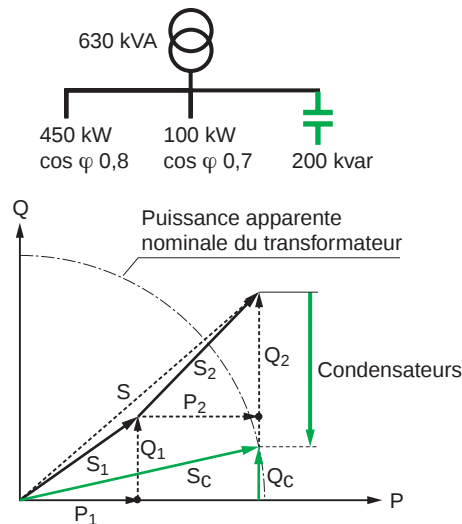
Amélioration du facteur de puissance

L'énergie réactive est consommée dans le circuit magnétique des charges telles les moteurs et par les éclairages fluorescents non compensés. En l'absence de correction, le courant circulant dans les conducteurs est augmenté, pour une même énergie active utilisée. Un ensemble important de ces charges selfiques implique un

déphasage entre l'intensité et la tension dans l'installation électrique du site. Le cosinus de l'angle de ce déphasage est appelé facteur de puissance : $\cos \varphi = FP$.

Pour $\cos \varphi = 1$, l'intensité et la tension sont en phase et l'intensité est minimale ; plus l'écart est important avec cette valeur idéale, plus le fonctionnement est dégradé, avec pour conséquences :

- une surintensité sur le réseau électrique du site, ainsi que sur le réseau public d'alimentation,
- des pertes supplémentaires par effet Joule sur tout le réseau,
- une surcharge et un échauffement des transformateurs et une limitation de la puissance active disponible (cf. **fig. 12**),



Le besoin

Ajouter dans une installation industrielle existante comportant un transformateur de puissance $S_n = 630 \text{ kVA}$, pour alimenter un ensemble de charges de puissance active $P = 450 \text{ kW}$ avec un $\cos \varphi = 0,8$, une charge de puissance $P_2 = 100 \text{ kW}$ avec $\cos \varphi = 0,7$.

Vérification préalable

La puissance apparente consommée est :

$$S_1 = P_1 / \cos \varphi = 450 / 0,8 = 563 \text{ kVA}$$

et la puissance réactive est :

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = 338 \text{ kVAR.}$$

La puissance apparente de la charge supplémentaire est :

$$S_2 = P_2 / \cos \varphi = 100 / 0,7 = 143 \text{ kVA}$$

sa puissance réactive est :

$$Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2} = 102 \text{ kVAR.}$$

La puissance apparente totale à fournir par le transformateur est $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

avec $P = P_1 + P_2 = 550 \text{ kW}$
et $Q = Q_1 + Q_2 = 440 \text{ kVAR}$ soit $S = 704 \text{ kVA}$.
Le nouveau facteur de puissance est
 $\cos \varphi = P / S = 0,78$.

Le constat

La puissance du transformateur existant est insuffisante pour alimenter cet ensemble de charges.

La solution : compenser l'énergie réactive.

Définition de la batterie de condensateurs, pour cela la puissance réactive corrigée doit permettre l'inégalité :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} < 630 \text{ kVA} \text{ donc :}$$

$$Q_{\max} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{630^2 - 550^2} = 307 \text{ kVAR}$$

Il faut donc prévoir au minimum :

$Q - Q_{\max} = 440 - 307 = 133 \text{ kVAR}$ qui donne un $\cos \varphi$ minimum $= P / S = 550 / 630 = 0,873$

Un banc de condensateurs de 200 kVAR est installé, d'où : $Q = 440 - 200 = 240 \text{ kVAR}$ et

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{550^2 + 240^2} = 600 \text{ kVA}$$

avec un $\cos \varphi = P / S = 550 / 600 = 0,917$.

Ceci pour un coût de $12\,000 \text{ €}$ (banc de condensateurs automatisé).

Avantages

- Des économies
 - d'énergie active correspondant à l'échauffement des circuits : $3\,000 \text{ kWh / an}$ soit 200 € / an ,
 - sur la puissance maximale appelée (en kVA) : $2\,500 \text{ € / an}$,
 - par suppression de $7\,000 \text{ € / an}$ de pénalités (arrêt de la consommation de $250\,000 \text{ kVARh / an}$).
- Le changement du transformateur par un plus puissant n'est pas nécessaire : une réserve de puissance est encore disponible.
- Le fonctionnement de ce transformateur dans de meilleures conditions dont la durée de vie sera plus longue.
- Un temps de retour sur investissement court : $1,3 \text{ an}$.

Fig. 12 : extension d'un réseau industriel avec compensation d'énergie réactive (source Schneider Electric).

■ une chute de tension en bout de ligne, qui peut induire un fonctionnement anormal de certains récepteurs sensibles,

■ dans de nombreux cas, une pénalité financière facturée par le distributeur d'énergie (dont les installations, elles aussi, sont surchargées par l'énergie réactive consommée par leurs clients), pénalité dont les modalités de calcul sont variables selon le pays et le distributeur.

La solution à ce problème est d'installer des générateurs d'énergie réactive (des condensateurs) soit au plus près des charges qui la consomment (compensation locale), soit dans des points choisis du réseau électrique (compensation centrale).

La compensation est faite sur la partie basse tension du réseau électrique et parfois, dans le cas d'installations plus puissantes, sur la partie moyenne tension.

Une compensation correcte permet de maintenir le fonctionnement d'une installation à un facteur de puissance supérieur à 0,93 qui est considéré comme satisfaisant.

Mais une installation ne fonctionne pas en permanence dans la même configuration : des circuits sont commutés, des charges sont mises en service ou hors service, des moteurs démarrent et s'arrêtent. Et il n'est pas souhaitable de laisser connectée en permanence la compensation calculée pour la charge maximale, car il y a un risque de « surcompensation » avec des surtensions nuisibles à l'installation et aux équipements. En pratique, une compensation optimale peut être réalisée avec des condensateurs groupés en « gradins », chaque gradin étant connecté au circuit électrique par un contacteur piloté par un régulateur assujéti au facteur de puissance mesuré.

Réduction du taux d'harmoniques

Des « harmoniques » (courants ou tensions de fréquence multiple de la fréquence de fonctionnement 50 ou 60 Hz) sont générés par certains récepteurs dits « non linéaires », notamment ceux qui comportent de l'électronique : appareils ménagers, ordinateurs, onduleurs, variateurs de vitesse... Ils se superposent au courant ou à la tension du réseau électrique.

Ces harmoniques, renvoyés en amont sur le réseau, constituent une pollution pour tous les autres récepteurs dont certains sont très sensibles. De plus ils sont aussi la cause de pertes d'énergie par effet Joule, qui peuvent couramment atteindre 10 % dans les conducteurs, les transformateurs et tous les récepteurs.

Préserver la qualité de l'énergie électrique (forme d'onde, fréquence...) oblige à réduire ou éliminer ces harmoniques, et pour cela à mettre en place des filtres anti-harmoniques adaptés au réseau et aux récepteurs du bâtiment dont la conception nécessite des études très spécialisées.

Dans des cas industriels très spécifiques (fours de métallurgie, machine à souder) les filtres sont insuffisants, c'est le réseau électrique qui doit être initialement conçu pour cette utilisation.

Réduction des pertes thermiques sur le réseau électrique

Ces pertes sont produites par le passage du courant dans toutes les parties du réseau électrique du bâtiment (effet Joule).

Le remplacement d'anciens appareils ou équipements par d'autres matériels récents permet de réduire de manière significative ces pertes :

■ les transformateurs de distribution (jusqu'à 3 MVA)

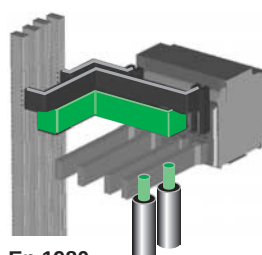
Les évolutions technologiques des matériaux et en particulier des tôles magnétiques permettent une réduction des pertes à vide de 15 à 20 % quelque soit le type de transformateur, immergé ou sec.

■ les tableaux et coffrets électriques

C'est une recherche sur leurs architectures de répartition qui a permis de réduire les longueurs des conducteurs d'environ 40 % dans les tableaux généraux basse tension - TGBT - et ainsi leurs pertes par effet Joule d'environ 30 % (cf. **fig. 13** page suivante). A cette économie d'énergie doit être ajoutée celle réalisable par le choix des appareils qui y sont intégrés. C'est le cas notamment des contacteurs, souvent en nombre dans les automatismes par exemple, alors que la consommation d'un ancien ensemble contacteur-disjoncteur d'un départ moteur de calibre 20 A « modèle D » consommait en maintien 20 W, un « modèle U » (marque Telemecanique) ne demande que 7 W. De telles réductions peuvent également éviter de climatiser le local électrique.

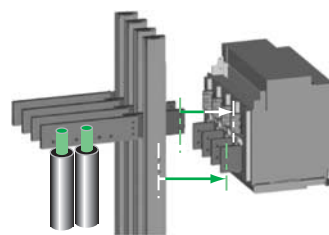
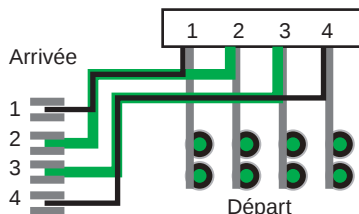
■ les ASI (Alimentation Sans Interruption)

Le rendement des onduleurs varie selon les caractéristiques de la charge alimentée (facteur de puissance notamment) et les technologies récentes ont permis une amélioration importante du rendement des onduleurs d'autant plus intéressante que le facteur de puissance est élevé : de l'ordre de 10 à 15 % par rapport aux systèmes plus anciens. En fonction de la puissance du réseau secouru, il est donc possible de réaliser une économie appréciable en remplaçant des onduleurs anciens.



En 1980

Longueur moyenne des liaisons
dans un TGBT : **50 cm**



En 2000

Longueur moyenne des liaisons
dans un TGBT : **5 cm**

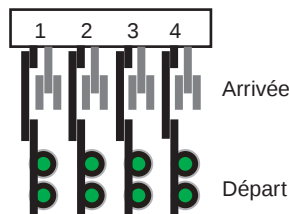


Fig. 13 : évolution de l'architecture d'un tableau électrique entre 1980 et 2000 (source Merlin Gerin Alpes).

4.5 Autres économies

Economies sur les fluides

Les systèmes de production et de distribution d'air comprimé, comme de vapeur, essentiellement développés pour les besoins des process, sont des gisements très importants d'économie d'énergie.

La distribution d'eau peut faire aussi l'objet de mesure d'économie, surtout lorsque la hauteur d'un bâtiment est importante, et rend nécessaire des pompes qui assurent une pression d'utilisation convenable.

La distribution économique de ces fluides obéit aux mêmes règles :

- adaptation de la pression de consigne au niveau strictement nécessaire au bon fonctionnement,
- réglage automatique du régime des pompes à la demande, et diminution du nombre de démarrages avec l'emploi de variateurs de vitesse sur les moteurs des pompes,

- détection et élimination de toute fuite qui ferait fonctionner inutilement les pompes,
- arrêt des pompes pendant les périodes de non-occupation.

Economie sur le fonctionnement des systèmes mécaniques

Les ascenseurs, élévateurs, escaliers roulants et systèmes de manutention sont mus par des moteurs électriques avec un grand nombre de démarrages et des variations importantes de charge.

Là encore, des économies d'énergie sont réalisables par une maintenance sérieuse effectuée par des professionnels, complétée de contrôles réguliers (les dérives de consommation sont souvent annonciatrices de panne).

La commande des moteurs par des variateurs de vitesse, outre les réductions de consommation, offre une plus grande souplesse de fonctionnement.

4.6 Avantages d'une bonne maintenance

La plupart des systèmes de confort et utilités du bâtiment doivent bénéficier de nos jours d'une maintenance périodique préventive pour les mêmes raisons (concurrence accrue et délais réduits) que les process. Elle peut aussi être complétée par un contrôle continu de l'état des systèmes. Par exemple, lorsqu'un simple moteur électrique commence à avoir un fonctionnement anormal à cause d'un défaut de fabrication, d'un dépassement de ses conditions normales de fonctionnement ou d'usure, cela se traduit

presque toujours par des échauffements anormaux, un ralentissement, une baisse de son facteur de puissance et une surconsommation. Ce défaut aboutit plus ou moins rapidement à une interruption de service, et pendant tout le temps où le défaut n'est pas détecté et corrigé, la consommation reste excessive.

Ainsi, la maintenance limite le nombre et la durée des interruptions de service, et elle permet de maintenir le rendement des différents équipements dans les plages nominales.

4.7 Importance du comptage

Il en est de même dans tous les bâtiments à usage collectif : les comportements individuels et les consommations changent selon que les charges d'un service commun sont réparties ou sont affectées suivant des relevés de consommation individuelle.

Cela peut paraître une évidence, mais l'une des plus importantes sources d'économie est le comportement des personnes. Il est donc nécessaire, pour une organisation qui a des objectifs de réduction des coûts, de responsabiliser tous ses services sur les économies réalisables.

L'installation et le relevé de compteurs d'énergie divisionnaires judicieusement placés avec, ou non, l'affectation des coûts réels (par service, par atelier, par étage, par système fonctionnel),

qui sensibilise les personnes concernées, est la première étape. Ces compteurs peuvent en même temps mesurer l'énergie réactive, les chutes de tension, les courants harmoniques. Un dispositif (automate ou ordinateur) peut être dédié à la centralisation des mesures et à l'établissement d'outils de gestion.

La seconde étape est dans l'analyse et la comparaison des consommations qui mettent en évidence les actions correctrices locales à entreprendre.

Ce comptage peut être complété, pour le chauffage (et la climatisation), par un comptage d'énergie thermique et/ou par des relevés de température pour vérifier ou modifier des consignes données.

4.8 La démarche d'audit énergétique

Voici la démarche (cf. **fig. 14**) que devrait suivre une entreprise quand elle exprime le souci de maîtriser l'énergie consommée dans son bâtiment :

- en connaissant la répartition des consommations énergétiques du bâtiment par fonction, par secteur, par étage... notamment avec les comptages partiels, s'ils existent. Tous les types d'énergie sont à prendre en compte additivement ;
- en disposant de modèles de référence représentatifs de l'activité et du type de bâtiment.

■ Selon le niveau de connaissance acquis, effectuer, si nécessaire, de nouvelles mesures. Par exemple, en installant des dispositifs de sous-comptage d'énergie, en nombre suffisant, aux points de répartition des réseaux, pour l'électricité et éventuellement pour les autres énergies (gaz, fioul), pour l'eau chaude, l'air comprimé, ...

■ Comparer les consommations mesurées par fonction avec les valeurs de référence des modèles permet d'identifier les fonctions les moins performantes (équipement rudimentaire ou obsolète, gestion ou organisation perfectible).

■ Bâtir et chiffrer des avant-projets de travaux d'amélioration susceptibles de procurer les économies les plus importantes, puis sélectionner un ou des projets étudiés, en fonction de leur efficacité et des retours sur investissement.

■ Réaliser les modifications matérielles et organisationnelles. En particulier former et informer les utilisateurs, promouvoir les nouveaux comportements.

■ Faire le bilan : le total des énergies consommées donne un premier résultat de cette démarche.

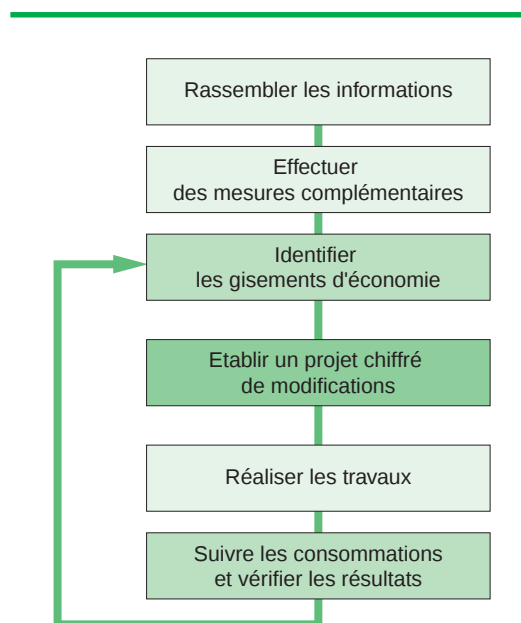


Fig. 14 : la démarche de réduction des consommations d'énergie.

Une mesure des nouvelles consommations partielles permet d'apprécier la pertinence des solutions mises en œuvre. Toutefois l'impact des travaux effectués doit être estimé avec réalisme : il faut, par exemple, tenir compte des variations climatiques, du niveau d'activité et de la fréquentation du bâtiment, du nombre de jours travaillés, ...

A partir de ces résultats, envisager d'autres projets d'économie d'énergie.

5 Etudes de cas

5.1 Optimisation de la facture d'énergie d'un hôpital

Cet hôpital, situé dans un pays d'Amérique Latine, cherchait à réduire ses dépenses d'électricité.

Dans le cas d'une structure de santé, la continuité de fourniture est évidemment une exigence majeure ; il existait donc une installation de trois groupes électrogènes utilisés pour faire face aux interruptions d'alimentation. L'examen des factures d'électricité mettait en évidence :

- un très important surcoût correspondant à la puissance appelée dans les périodes « heures de pointe » définies par la régie,
- des pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.

La solution proposée, et qui a été mise en œuvre, comprend :

- une installation d'un système de contrôle automatique pour l'exploitation des trois générateurs existants,
- une installation de batteries de condensateurs pour la compensation d'énergie réactive,
- un dispositif de contrôle de la demande d'énergie électrique.

Le comparatif des factures avant et après la modification a mis en évidence une économie globale de 17 % (cf. **fig. 15**).

Compte tenu du prix des travaux effectués, le délai de retour sur investissement a été estimé à 2,6 ans.

	Avant US\$	Après US\$	Economie US\$	%
Charges fixes	13	13	0	0
Autres charges	1 092	1 092	0	0
Energie	121 768	111 296	10 472	9
Demande maximale	17 600	15 840	1 760	10
Demande heures de pointe	49 308	0	49 308	100
Pénalité FP	1 525	0	1 525	100
Fonctionnement des groupes		30 583	-30 583	
	191 306	158 824	32 482	17

Fig. 15 : comparatif des factures de fourniture d'électricité d'un hôpital, avant et après modifications.

5.2 Installation de ventilation avec variateur de vitesse

Dans la grande majorité des installations de ventilation, le ventilateur est mu par un moteur connecté directement au réseau. Le moteur ne peut donc tourner qu'à sa vitesse nominale. Le débit d'air circulant dans les canalisations est adapté en amont ou en aval du ventilateur à l'aide de ventelles ou volets dont l'inclinaison déterminera la section de passage et le débit.

L'installation d'un variateur de vitesse permet d'éliminer les ventelles, le débit d'air étant réglé uniquement par la vitesse de rotation du moteur. Les avantages sont nombreux (cf. **fig. 16**) :

- le démarrage se fait progressivement, sans point de courant, avec un bruit réduit, sans échauffement du moteur ;
- le facteur de puissance est nettement amélioré, au démarrage et en régime établi ;
- la durée de vie du moteur est allongée ;

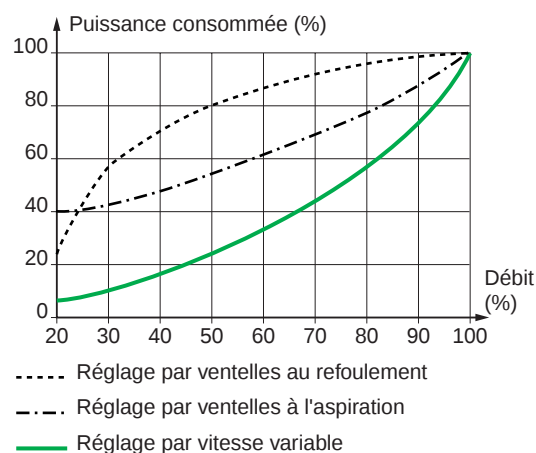


Fig. 16 : courbes débit – puissance d'un ventilateur.

■ l'économie d'énergie est importante : en effet, à partir d'un point de fonctionnement nominal à débit maximal, le comportement du système est très différent avec ou sans variateur (voir courbe débit – puissance du ventilateur) ; ainsi, pour un débit égal à 80 % du débit nominal, la réduction de puissance consommée est de 3 % sans variateur, et 50 % avec variateur ;

■ enfin, avec les variateurs modernes équipés de filtrage les réjections de courants harmoniques sur le réseau amont ne sont plus à craindre.

Des logiciels de calcul permettent d'évaluer précisément l'économie réalisée et le retour sur investissement.

Ainsi, pour un ventilateur mu par un moteur de 20 kW, ayant un régime de fonctionnement journalier comprenant :

- 2 h à 100 % du débit,
- 6 h à 80 %,
- 4 h à 50 %,
- 12 h à 20 %,

l'adaptation d'un variateur de vitesse et la suppression des ventelles de réglage au refoulement réduisent notablement les consommations (cf. **fig. 17**).

Le retour sur investissement est de l'ordre de 6 mois.

	Sans variateur	Avec variateur	Economies réalisées
Energie active (kWh / an)	126 600	55 700	70 900
Energie réactive (kVARh / an)	78 450	0	78 450

Fig. 17 : économies réalisables par l'utilisation d'un variateur de vitesse pour une ventilation
(Référence du variateur : ALTIVAR-Telemecanique ATV58HD28N4, avec inductance de ligne incorporée, source Schneider Electric).

6 Conclusion

La maîtrise de la consommation d'énergie est depuis longtemps un souci majeur pour beaucoup de pays -même ceux qui n'ont pas signé le protocole de Kyoto- par souci d'équilibre budgétaire et par crainte de pénuries qui peuvent être dues notamment :

- à un parc de centrales de production électrique opérationnelles insuffisant,
- à un réseau de transport d'énergie électrique obsolète ou inefficace.

Cette préoccupation, au niveau mondial, n'a cessé de se renforcer dans les dernières années et tout indique qu'il en sera encore longtemps ainsi.

D'autre part, pour réduire les émissions de CO₂ et le réchauffement de l'atmosphère, certains états ont lancé des actions qui, selon toute vraisemblance, seront prolongées à long terme et étendues à d'autres pays. La pression et les incitations ne feront qu'augmenter dans les prochaines décennies dans beaucoup de pays.

Les utilisateurs, quant à eux, exigent de préserver et d'améliorer le bon fonctionnement de leur outil de travail et le niveau de confort de leurs bâtiments, tout en se conformant aux réglementations nationales, et en maîtrisant les charges de leur consommation d'énergie.

Les acteurs professionnels du domaine de la distribution et de la gestion de l'énergie (bureaux d'études, installateurs, entreprises de service) sont donc les premiers concernés : ils doivent développer et mettre à disposition de leurs clients les solutions les plus innovantes, tant lors de travaux d'amélioration que lors de la conception de nouveaux immeubles.

Pour cela, les constructeurs les plus avancés de matériel électrotechnique, comme Schneider Electric, mettent au point des gammes d'appareils intégrant intelligence et communication, aptes à remplir les fonctions nécessaires.

Enfin, dans une démarche de recherche d'économie d'énergie d'un bâtiment, un audit énergétique pertinent est une étape indispensable pour aboutir à une optimisation réelle des consommations.

Annexe : la cogénération

La cogénération est définie comme la génération associée d'énergie électrique et thermique à partir de la même source de combustible.

Il faut distinguer deux concepts différents de cogénération : cycle amont et cycle aval.

Cycle amont

Le but premier est la génération d'énergie électrique, la vapeur ou l'eau chaude sont utilisées comme sous-produit dans le process. Exemple : les papeteries, qui nécessitent de l'énergie électrique, de la vapeur et de l'eau chaude dans leur process.

Trois applications courantes :

■ **Turbine à vapeur** : un combustible est brûlé pour produire de la vapeur à haute pression qui entraîne un turbo-alternateur, l'échappement de la turbine est utilisé sous forme de vapeur à pression réduite ou d'eau chaude.

■ **Turbine à gaz** : une turbine à gaz est utilisée pour produire de l'électricité, les gaz d'échappement (à environ 500 °C) sont dirigés vers un récupérateur de chaleur qui produit de la vapeur ou de l'eau chaude utilisée dans le process (cf. **fig. 18**). Ce procédé est utilisé dans différentes industries, ainsi que dans les hôpitaux, les aéroports...

■ **Moteur diesel** : un moteur diesel entraîne un alternateur, le circuit de refroidissement du moteur sert à produire de l'eau chaude pour le chauffage, par exemple l'eau d'une piscine.

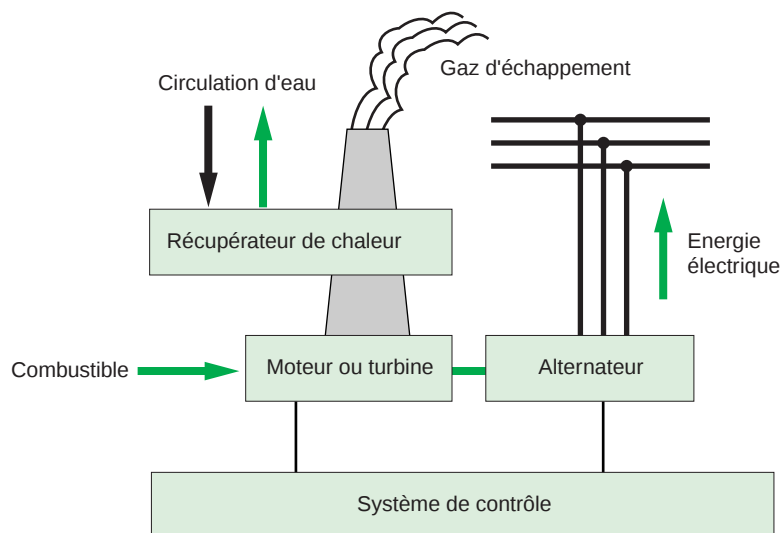


Fig. 18 : cogénération : cycle amont.

Cycle aval

La chaleur ou les gaz chauds, sous-produits d'un process de fabrication, sont utilisés pour la génération d'énergie électrique. Les exemples, moins nombreux, concernent l'industrie lourde (fours d'aciérie notamment).

Les gaz chauds rejetés sont utilisés pour produire de la vapeur qui alimente une turbine entraînant un alternateur (cf. **fig. 19** page suivante). Couramment, l'électricité ainsi produite est vendue au distributeur local.

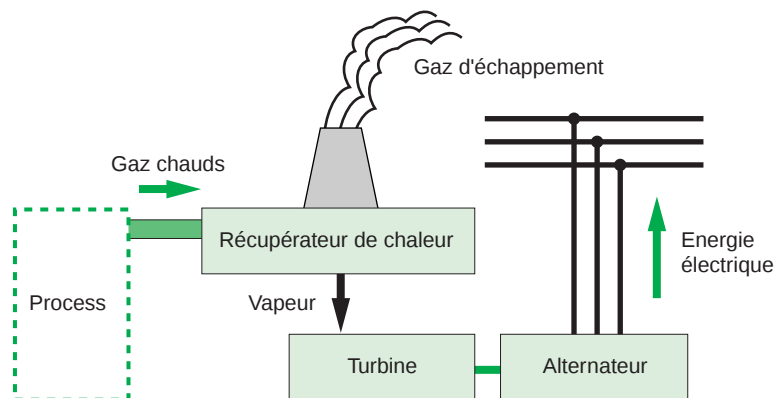


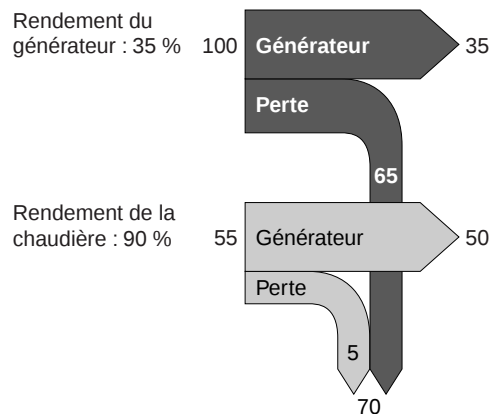
Fig. 19 : cogénération : cycle aval.

Avantage

Un système de cogénération a un meilleur rendement global sur le combustible que des systèmes séparés, avec couramment jusqu'à 30 % d'économie (cf. fig. 20).

Une grande variété de combustibles peuvent être utilisés : gaz naturel, fioul, charbon, bois, déchets agricoles (biomasse), ordures ménagères.

Système conventionnel séparé :



Cogénération :

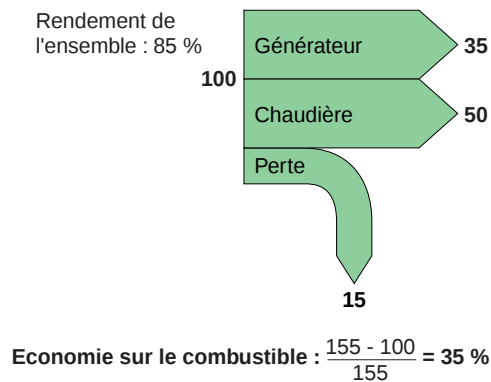


Fig. 20 : bilan énergétique cogénération.

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : 33 (0)4 76 57 98 60
E-mail : fr-tech-com@mail.schneider.fr

Réalisation : AXESS - Valence (26).
Edition : Schneider Electric
- 20 € -